System Engineering and Productivity/ 2027/ Vol.7/ No.2/ 229-251

System Engineering and Productivity

10.22034/sep.2026.2097693.1547

Location-Routing in Humanitarian Logistics with Fuzzy Demand and Scenario-Based Network Recovery: An NSGA-II-Based Multi-Objective Approach

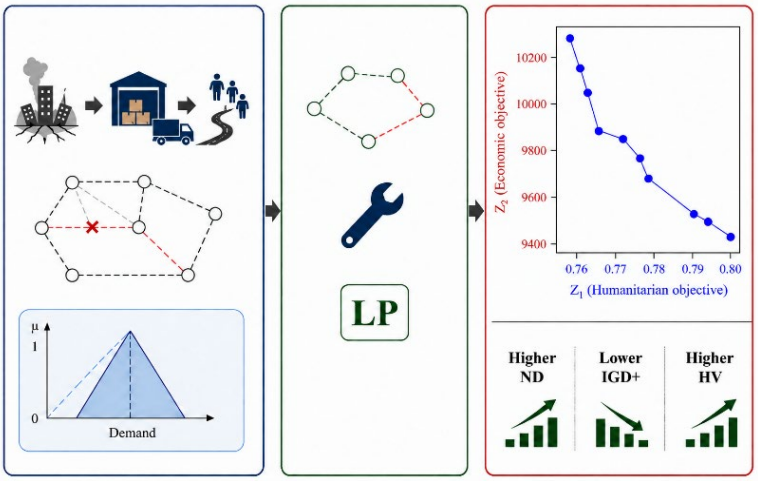
Habibeh Nazif

Department of Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Development of an integrated bi-objective location-routing model for multi-period humanitarian relief operations.
- Modeling fuzzy demand and exogenous recovery of the transportation network.
- Development of a problem-specific NSGA-II incorporating a repair procedure and a linear programming subproblem.
- Improvement in HV and IGD+ across small, intermediate, and large instances compared with the baseline NSGA-II.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 29 October 2026
Revised: 7 December 2026
Accepted: 8 December 2026
Available online: 13 December 2025
*Correspondence:
h_nazif@pnu.ac.ir
How to cite this article:
Nazif, H. (2027). Location-Routing in Humanitarian Logistics with Fuzzy Demand and Scenario-Based Network Recovery: An NSGA-II-Based Multi-Objective Approach. *System Engineering and Productivity*, 7 (2), 229-251.

Keywords:
Humanitarian Logistics
Location-Routing
Fuzzy Demand
Network Recovery
Multi-Objective Optimization

ABSTRACT

Disaster relief operations face demand uncertainty and time-varying accessibility of transportation networks. This study proposes a bi-objective mixed-integer linear programming model for integrated decision-making on depot location, vehicle allocation, inventory, delivery, and multi-period routing. Demand is represented using triangular fuzzy numbers and defuzzified through the expected value method. Route conditions are modeled based on exogenous, scenario-based network recovery using continuous performance levels and binary traversability. The first objective minimizes a normalized combination of effective travel time and cumulative shortage, while the second minimizes depot, transportation, and shortage costs. To solve the problem, a problem-specific variant of NSGA-II is developed, incorporating route-based encoding, a repair procedure, and a linear programming subproblem. Results from 20 independent runs on 10 benchmark instances demonstrate the method's ability to generate non-dominated solutions. Sensitivity analyses further confirm the effects of network recovery speed and demand uncertainty. Compared with the baseline NSGA-II across five selected instances spanning small, intermediate, and large scales, the proposed method achieved higher mean HV and lower mean IGD+ in every instance; the differences in both indicators were statistically significant.

2538-2195/© 2027 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

Disasters simultaneously increase the demand for essential supplies and reduce the accessibility of transportation networks. Effective humanitarian logistics therefore requires coordinated decisions on relief-warehouse locations, vehicle allocation, inventory, deliveries, and routing over time. Independent planning of these decisions may produce poorly located facilities, infeasible routes, delayed deliveries, and excessive shortages. Two major challenges are the imprecision of early demand estimates and the changing condition of damaged roads. Fuzzy numbers can represent demand when reliable probability distributions are unavailable, while a time-dependent network is required to reflect gradual road reopening.

Previous research has examined optimization in emergency logistics (Caunhye et al., 2012), integrated facility location and network restoration (Sanci & Daskin, 2019), and humanitarian location-routing under uncertain demand and road closure (Temiz et al., 2025). Nevertheless, the simultaneous consideration of triangular fuzzy demand, period-dependent network accessibility, accumulated shortages, and integrated location-routing decisions remains limited.

This study contributes by developing a bi-objective, multi-period mixed-integer linear programming model that jointly determines warehouse activation, vehicle assignment, inventory, delivery quantities, and routes. Unmet demand is transferred between periods as accumulated shortage, while network recovery is modeled as an exogenous scenario-based process. A problem-specific NSGA-II is developed using route-based encoding, a linear programming subproblem, a feasibility-oriented repair procedure, and inter-vehicle and inter-period mutations. The contribution of these mutations is further examined through a controlled paired comparison with a baseline version.

2. Methodology

The post-disaster transportation system is represented by a directed graph containing affected areas, candidate warehouses, and intermediate connection nodes. The planning horizon is divided into discrete periods, and a homogeneous vehicle fleet is considered. In each period, a vehicle is assigned to at most one active warehouse, begins and ends its route at that warehouse, and may serve multiple affected areas. Split delivery is allowed. Warehouse capacity, initial inventory, periodic supply, vehicle capacity, road capacity, and accessibility are limited, and unmet demand is carried forward.

Demand for each area and period is expressed as a triangular fuzzy number with lower, most likely, and upper values. The expected-value method converts fuzzy demand into an equivalent deterministic value. Road damage is normalized within each benchmark instance. Under each recovery scenario, a road is passable when its normalized damage does not exceed the cumulative recovery threshold of the corresponding period. The thresholds are non-decreasing; therefore, network accessibility cannot deteriorate over time. A continuous performance coefficient is assigned to each open road, and effective travel time increases as road performance decreases.

The first objective minimizes a normalized combination of effective travel time and time-weighted accumulated shortage. The second minimizes warehouse activation, transportation, and shortage costs. The constraints enforce demand and inventory balances, warehouse and vehicle capacities, vehicle assignment, route continuity, delivery-visit consistency, road accessibility and capacity, and subtour elimination.

Because the model becomes computationally demanding for larger instances, a problem-specific NSGA-II is used (Deb et al., 2002). A chromosome comprises a warehouse-activation vector, vehicle-to-warehouse assignments, and customer-visit sequences for each vehicle and period. Intermediate nodes are inserted during decoding through shortest passable paths. Once the discrete decisions are fixed, a linear programming subproblem determines deliveries, inventories, and shortages. The repair procedure activates at least one warehouse, corrects invalid assignments, removes repeated visits within each route, eliminates inaccessible visits, ensures return to the origin, and resolves road-capacity violations.

Half of the initial population is generated heuristically and half through controlled random generation. Uniform crossover is applied to location and assignment components, while order crossover is used for compatible routes. Standard mutations include bit-flip, reassignment, swap, relocation, and inversion. The proposed algorithm additionally employs inter-vehicle and inter-period relocation operators, allowing customer visits to move between vehicles and periods.

Ten MDDVRPSRC benchmark instances (Anuar et al., 2022) were extended to four periods. The base experimental setting used fast demand arrival, base demand uncertainty, and medium network recovery. Each instance was solved in 20 independent runs with seeds 0–19, a population of 40, 60 generations, a crossover probability of 0.90, and a mutation probability of 0.10. Performance was evaluated through the number of non-dominated solutions (ND), hypervolume (HV), IGD+, spacing, and runtime.

3. Results and Discussion

The proposed algorithm produced non-dominated solutions for all instances. Average ND ranged from 3.15 to 8.05, with the largest value obtained for D9N30S10. The highest average HV was 0.90903 and the lowest average IGD+ was 0.13493, both obtained

for D4N30S10. D9N30S10 also achieved strong performance, with HV and IGD+ values of 0.90683 and 0.13905, respectively. Average runtimes ranged from 13.11 to 28.21 seconds. The empirical front of D9N30S10 demonstrated a clear trade-off: improving humanitarian performance generally increased economic cost, confirming the value of providing decision-makers with multiple compromise solutions. Sensitivity analysis showed that recovery speed affected both objective values and front quality. Fast recovery produced the highest HV of 0.8874, although the objectives and IGD+ did not change monotonically. This indicates that road reopening interacts with route availability, travel time, resource allocation, and shortage decisions. Demand uncertainty also affected performance. From the low to high uncertainty level, the economic objective increased from 5174.11 to 5301.32, while HV decreased from 0.8982 to 0.8205. Thus, under the adopted fuzzy representation and defuzzification method, greater demand uncertainty was associated with higher cost and weaker objective-space coverage.

The proposed algorithm was compared with a baseline version in which only the inter-vehicle and inter-period mutations were disabled. All other components, parameters, and seeds were identical. The comparison covered five instances: D3N8S3, D7N18S7, D8N20S8, D8N22S9, and D9N30S10; each was evaluated using 20 paired runs and a common empirical reference front.

Across the five compared instances, the proposed version achieved higher mean HV and lower mean IGD+. For the three intermediate instances, IGD+ decreased by 84.55%, 79.01%, and 87.24%, respectively. Average ND increased from approximately 1.00–1.20 in the baseline to 4.40, 4.50, and 6.05 in the proposed version. The exact paired Wilcoxon test yielded ($p = 1.91 \times 10^{-6}$) for HV and IGD+ in the three intermediate instances; exact paired tests for added small and large instances were also statistically significant. The zero spacing values frequently observed for the baseline did not indicate better distribution because its fronts often contained only one point. Overall, the consistent improvements in HV and IGD+ across small, intermediate, and large instances demonstrate the effectiveness of the problem-specific mutations in improving front quality and diversity.

4. Conclusions

This study presented an integrated humanitarian location-routing model under fuzzy demand and scenario-based network recovery and developed a problem-specific NSGA-II for its solution. Computational results showed that the method generated diverse non-dominated solutions within manageable runtimes. Sensitivity analyses confirmed the effects of recovery speed and demand uncertainty, while the paired comparison demonstrated the significant contribution of the proposed structural mutations. Future research may consider heterogeneous fleets, multiple relief commodities, endogenous road restoration, additional uncertain parameters, real disaster data, and comparisons with other multi-objective algorithms.

Acknowledgments

The author sincerely acknowledges the editorial staff of the System Engineering and Productivity journal for their valuable support and cooperation.

Funding

This research received no external funding

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Author Contribution Statement

Habibeh Nazif: Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Project administration, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

The data underlying the findings of this study are available from the author upon reasonable request.

References

Anuar, W. K., Lee, L. S., & Pickl, S. (2022). Benchmark dataset for multi depot vehicle routing problem with road capacity and damage road consideration for humanitarian operation in critical supply delivery. *Data in Brief*, *41*, 107901. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107901

Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, *46*(1), 4–13. https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(2), 182–197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

Sanci, E., & Daskin, M. S. (2019). Integrating location and network restoration decisions in relief networks under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *279*(2), 335–350. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.012

Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2025). A probabilistic bi-objective model for a humanitarian location-routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational*

Research, *32*(2), 590–625. https://doi.org/10.1111/itor.13475

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۶/ دوره ۷/ شماره ۲/ صفحه ۲۲۹-۲۵۱

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

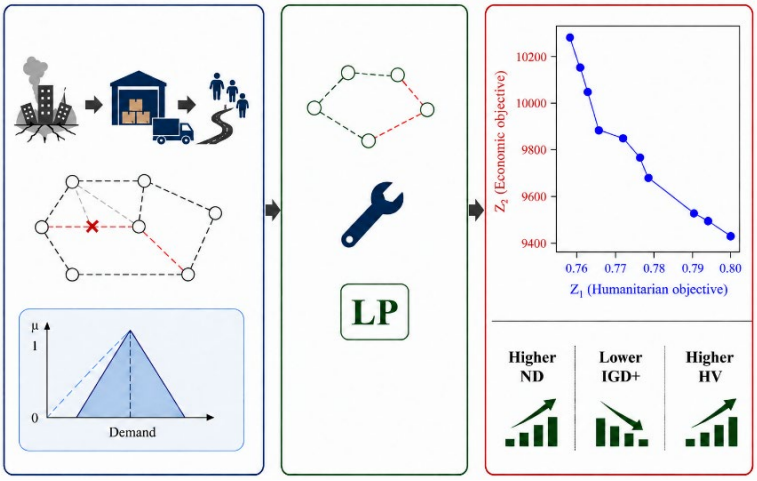
10.22034/sep.2026.2097693.1547

مکان‌یابی–مسیریابی در لجستیک بشردوستانه با تقاضای فازی و بازیابی سناریومحور شبکه: یک رویکرد چندهدفه مبتنی بر NSGA-II

حبیبه نظیف

گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- ارائه مدل دوهدفه یکپارچه مکان‌یابی-مسیریابی برای امدادرسانی چنددوره‌ای
- مدل‌سازی تقاضای فازی و بازیابی برون‌زای شبکه حمل‌ونقل
- توسعه NSGA-II مسئله‌محور با رویه اصلاح و زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی
- بهبود HV و IGD+ نسبت به NSGA-II پایه در نمونه‌های کوچک، میانی و بزرگ

چکیده

عملیات امدادرسانی پس از بلایا با عدم‌قطعیت تقاضا و تغییرات زمانی دسترسی شبکه حمل‌ونقل مواجه است. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای تصمیم‌گیری یکپارچه درباره مکان‌یابی انبار، تخصیص خودرو، موجودی، تحویل و مسیریابی چنددوره‌ای ارائه می‌کند. تقاضا با اعداد فازی مثلثی و روش ارزش مورد انتظار قطعی‌سازی می‌شود. وضعیت مسیرها براساس بازیابی برون‌زا و سناریومحور شبکه، با سطح عملکرد پیوسته و قابلیت تردد دودویی مدل می‌شود. هدف نخست، ترکیب نرمال‌شده زمان سفر مؤثر و کمبود انباشته و هدف دوم، هزینه‌های انبار، حمل‌ونقل و کمبود را کمینه می‌کند. برای حل مسئله، نسخه‌ای مسئله‌محور از NSGA-II با کدگذاری مسیرمحور، رویه اصلاح و زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی توسعه یافت. نتایج ۲۰ اجرای مستقل روی ۱۰ نمونه معیار، توانایی روش را در تولید جواب‌های نامغلوب نشان داد. تحلیل حساسیت نیز اثر سرعت بازیابی شبکه و عدم‌قطعیت تقاضا را تأیید کرد. در مقایسه با نسخه پایه NSGA-II در پنج نمونه منتخب با مقیاس‌های کوچک، میانی و بزرگ، روش پیشنهادی در تمامی نمونه‌ها به میانگین HV بالاتر و میانگین IGD+ پایین‌تر دست یافت؛ تفاوت‌های هر دو شاخص نیز از نظر آماری معنادار بودند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۶.

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۷/۱۶

*نویسنده مسئول:

h_nazif@pnu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

لجستیک بشردوستانه

مکان‌یابی-مسیریابی

تقاضای فازی

بازیابی شبکه

بهینه‌سازی چندهدفه

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۷ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

بلایای طبیعی و انسان‌ساخت می‌توانند به‌طور هم‌زمان تقاضا برای اقلام حیاتی را افزایش دهند و ظرفیت زیرساخت‌های حمل‌ونقل را کاهش دهند. اثربخشی لجستیک بشردوستانه به هماهنگی تصمیم‌های مکان‌یابی انبار، تخصیص موجودی و ناوگان، و مسیریابی در طول زمان وابسته است (Caunhye et al., 2012).

دو منبع اصلی پیچیدگی در روزهای نخست بحران، ابهام در برآورد تقاضا و ناپایداری شبکه راه‌هاست: داده‌های تقاضا معمولاً به‌صورت حد پایین، مقدار محتمل و حد بالا بیان می‌شوند که نمایش آن با عدد فازی مثلثی می‌تواند این ابهام را شفاف ثبت کند؛ همچنین دسترسی یال‌های شبکه با پیشرفت آواربرداری و تعمیر در طول زمان تغییر می‌کند و فرض شبکه ایستا می‌تواند زمان سفر و امکان‌پذیری مسیرها را به‌طور معناداری تحریف کند.

با وجود پژوهش‌های گسترده در حوزه لجستیک بشردوستانه، در بسیاری از مدل‌های موجود، تصمیم‌های مکان‌یابی، موجودی و مسیریابی به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه در نظر گرفته نمی‌شوند یا دسترسی یال‌ها در طول افق برنامه‌ریزی ثابت فرض می‌شود. بر این اساس، مسئله پژوهش حاضر چنین تعریف می‌شود: چگونه می‌توان مکان انبارهای امدادی، تخصیص خودروها، موجودی، مقدار تحویل و مسیرهای چنددوره‌ای را به‌گونه‌ای یکپارچه تعیین کرد که هم عملکرد بشردوستانه و هم هزینه، در حضور تقاضای فازی و بازگشایی تدریجی مسیرها، بهبود یابد؟ برای پاسخ، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه[1] (MO-MILP) ارائه می‌شود که در آن بازگشایی مسیر تصمیم برون‌زا و سناریومحور است؛ یعنی مدل زمان‌بندی تعمیر را انتخاب نمی‌کند، بلکه پیامد سناریوهای از پیش تعریف شده بازیابی شبکه را بر تصمیم‌های لجستیکی ارزیابی می‌کند.

مشارکت‌های اصلی پژوهش عبارتند از: (۱) ترکیب تقاضای فازی و تغییرات دوره‌ای دسترسی شبکه در یک مدل چندهدفه مکان‌یابی-مسیریابی؛ (۲) یکپارچه‌سازی تصمیم‌های مکان‌یابی انبار، تخصیص خودرو، موجودی، تحویل و مسیریابی در افق چنددوره‌ای؛ (۳) درنظرگرفتن کمبود انباشته برای انتقال تقاضای تأمین‌نشده میان دوره‌ها؛ (۴) توسعه یک روش حل مسئله‌محور مبتنی بر NSGA-II[2] شامل کدگذاری مسیرمحور، زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی[3] (LP) و رویه اصلاح متناسب با قیود مسئله؛ و (۵) ارزیابی محاسباتی راه‌حل‌های مصالحه‌ای و بررسی حساسیت عملکرد سیستم نسبت به سرعت بازیابی شبکه و عدم‌قطعیت تقاضا.

ادامه مقاله به این ترتیب است: بخش ۲ ادبیات پژوهش را بررسی می‌کند؛ بخش ۳ مدل ریاضی را ارائه می‌دهد؛ بخش ۴ الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر NSGA-II را تشریح می‌کند؛ بخش ۵ طراحی آزمایش‌ها و نتایج را گزارش می‌کند؛ و بخش ۶ به نتیجه‌گیری و مسیرهای پژوهش آینده اختصاص دارد.

۲- بررسی ادبیات پژوهش

۲-۱- مدل‌های کلاسیک و قطعی

اوزدمر و همکارن یک چارچوب برنامه‌ریزی پویا برای حمل اقلام امدادی ارائه کردند و نقش زمان‌بندی توزیع را برجسته ساختند (Özdamar et al., 2004). شئو (Sheu, 2007) سازوکاری برای توزیع سریع اقلام در پاسخ به تقاضای اضطراری توسعه داد. یی و کومار (Yi & Kumar, 2007) الگوریتم کلونی مورچگان را برای عملیات امدادی به‌کارگرفتند. مسائل مسیریابی امدادی با تمرکز بر سرعت و عدالت در خدمت‌رسانی، توسط کمپبل و همکاران (Campbell et al., 2008) بررسی شد. آنها معیارهای کمینه‌سازی بیشترین و میانگین زمان رسیدن را برای مسائل مسیریابی پیشنهاد دادند. همچنین مشیری و رشیدی (Moshiri & Rashidi Komijan, 2023) با ارائه یک مدل یکپارچه چند دوره‌ای تأمین-تولید-توزیع، اهمیت هماهنگ‌سازی تصمیم‌های عملیاتی شبکه را نشان دادند.

۲-۲- مدل‌های مبتنی بر عدم قطعیت تقاضا

باربارosوغلو و آردا با برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای، عدم قطعیت برنامه‌ریزی حمل در بحران را بررسی کردند (Barbarosoğlu & Arda, 2004). بالچیک و بیمون مدلی برای مکان‌یابی مراکز توزیع امدادی و تعیین موجودی

[1] Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming

[2] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

[3] Linear Programming

پیش جانمایی شده ارائه کردند که تصمیم‌های مکان‌یابی و موجودی را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد (Balcik & Beamon, 2008). همچنین راولز و ترنکوئیست، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای تعیین مکان و مقدار اقلام امدادی پیش جانمایی شده، با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و دسترسی شبکه حمل‌ونقل پس از بحران، ارائه کردند (Rawls & Turnquist, 2010). نجفی و همکاران یک مدل چندهدفه، چندکالایی و چنددوره‌ای برای مدیریت حمل اقلام امدادی و مجروحان در فاز پاسخ به زلزله ارائه نمودند و با به‌کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار، عدم‌قطعیت موجود در شرایط پس از بحران را در برنامه‌ریزی لجستیکی لحاظ کردند (Najafi et al., 2013). توفیقی و همکاران یک مدل طراحی شبکه لجستیک بشردوستانه دوسطحی برای پیش جانمایی موجودی و توزیع اقلام ارائه کردند و با استفاده از برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی مبتنی بر سناریو، عدم قطعیت عرضه، تقاضا و دسترسی شبکه حمل‌ونقل را در نظر گرفتند (Tofighi et al., 2016).

در امتداد رویکردهای یکپارچه، یک مدل دوهدفه مکان‌یابی-موجودی با ظرفیت محدود توسط ملک‌پور کلبادی‌نژاد و باقری‌نژاد ارائه و عملکرد NSGA-II و SPEA2 در ابعاد بزرگ مقایسه شد (Malekpour Kolbadinejad & Bagherinejad, 2023). همچنین صیادی و همکاران ارزیابی ریسک زنجیره تأمین پایدار را در محیط فازی شهودی بررسی کردند و کاربرد رویکرد فازی را برای بازنمایی ارزیابی‌های مبهم نشان دادند (Sayyadi Tooranloo et al., 2023).

۲-۳- شبکه آسیب‌دیده و بازیابی مسیرها

در شبکه پس از بحران، زمان سفر و امکان عبور از یال‌ها ممکن است در طول زمان تغییر کند. یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی پویا و چندهدفه برای برنامه‌ریزی لجستیک امدادی تحت عدم قطعیت تقاضا، زمان سفر و هزینه توسط بزرگی امیری و خورسی ارائه شد (Bozorgi-Amiri & Khorsi, 2016). سانچی و دسکین (Sanci & Daskin, 2019) تصمیم‌های مکان‌یابی و بازیابی شبکه را در یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای یکپارچه کردند و نشان دادند که در نظرگرفتن هم‌زمان تعمیر شبکه و مکان‌یابی تسهیلات، کیفیت پاسخ را بهبود می‌دهد. خوانچه‌زرین و همکاران یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی چندهدفه با درنظرگرفتن کمک‌های مردمی برای عملیات امداد ارائه دادند (Khanchehzarrin et al., 2022). فرزانه و همکاران چارچوبی یکپارچه برای هماهنگی ارزیابی خسارت، بازیابی جاده و توزیع امداد ارائه کردند که در آن از پهپادهای پیش جانمایی شده برای جمع‌آوری اطلاعات خسارت و آوار استفاده می‌شود (Farzaneh et al., 2023). نتایج آنها اهمیت هماهنگی عملیات بازیابی جاده و توزیع امداد و نیز سرعت انتشار اطلاعات خسارت را در عملکرد سیستم نشان داد. از منظر مدیریت اختلال نیز، حسن‌پور و همکاران با مدل پویایی سیستم نشان دادند که به‌کارگیری تأمین‌کننده پشتیبان می‌تواند هزینه و زمان پاسخ‌گویی به تقاضا را در شرایط اختلال کاهش دهد (Hassanpour et al., 2023).

وحدانی و همکاران نیز یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای مکان‌یابی-مسیریابی برای توزیع اقلام امدادی پس از زلزله ارائه کردند که در آن مکان‌یابی مراکز توزیع، مسیریابی خودروها و تعمیر اضطراری جاده‌های آسیب‌دیده به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شده است (Vahdani et al., 2018). مسئله مکان‌یابی-مسیریابی چنددوره‌ای تسهیلات اضطراری با عدم‌قطعیت تقاضا و زمان حمل و رویکرد ریسک‌گریز توسط هو و همکاران (Hu et al., 2024) بررسی شد. در مدل آن‌ها، تغییرات موجودی و تقاضا در دوره‌های مختلف لحاظ شده است؛ لیکن، روند بازیابی تدریجی شبکه آسیب‌دیده و تقاضای فازی در نظر گرفته نشده است. همچنین تِمیز و همکاران یک مدل احتمالی دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی برای لجستیک بشردوستانه با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت تقاضا و بسته‌شدن جاده‌ها ارائه کردند. این مدل تغییرات چنددوره‌ای بازیابی شبکه، کمبود انباشته و تقاضای فازی مثلثی را به‌صورت یکپارچه پوشش نمی‌دهد (Temiz et al., 2025).

در حوزه امداد، قیصریه و همکاران یک مدل مکان‌یابی-تخصیص برای تخلیه آسیب‌دیدگان با اولویت وضعیت جسمانی ارائه و آن را با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب در منطقه شش تهران اجرا کردند (Gheysarieh et al., 2024).

آنوار و همکاران (Anuar et al., 2022) مجموعه داده MDDVRPSRC را برای مسائل مسیریابی پویای چندانباره

در عملیات بشردوستانه ارائه کردند که شامل اطلاعات شبکه، نقاط تقاضا، ظرفیت جاده‌ها و میزان آسیب یال‌هاست؛ آسیب جاده نیز بر زمان سفر و ظرفیت مسیرها اثر می‌گذارد. در پژوهش حاضر، این داده به یک ساختار چنددوره‌ای گسترش داده شده است. از آنجا که زمان‌بندی تعمیر جاده‌ها در داده اصلی مشخص نشده است، روند بازیابی شبکه به‌صورت برون‌زا و سناریومحور تعریف و وضعیت دسترسی مسیرها در هر دوره به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات منتخب

Table 1. Comparison of the present study with selected studies

پژوهش	رویکرد اصلی	نوع عدم قطعیت تقاضا	چنددوره‌ای	چندهدفه	مکان‌یابی-مسیریابی یکپارچه
Özdamar et al., 2004	برنامه‌ریزی پویای حمل امدادی	ندارد	بله	خیر	خیر
Barbarosoğlu & Arda, 2004	برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای حمل امدادی	تصادفی سناریومحور	خیر	خیر	خیر
Sheu, 2007	توزیع پویای امدادی با خوشه‌بندی فازی	پیش‌بینی پویای تقاضا	بله	بله	خیر
Balcik & Beamon, 2008	مکان‌یابی-موجودی امدادی	سناریومحور	خیر	خیر	خیر
Najafi et al., 2013	بهینه‌سازی تصادفی-استوار لجستیک امدادی	تصادفی-استوار	بله	بله	خیر
Tofighi et al., 2016	طراحی شبکه امدادی با برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی	امکانی-تصادفی	خیر	بله	خیر
Vahdani et al., 2018	مکان‌یابی-مسیریابی با تعمیر اضطراری جاده	ندارد	بله	بله	بله
Bozorgi-Amiri & Khorsi, 2016	مکان‌یابی-مسیریابی پویای تصادفی	تصادفی	بله	بله	بله
Sanci & Daskin, 2019	مکان‌یابی و بازیابی شبکه با برنامه‌ریزی تصادفی	تصادفی سناریومحور	بله	خیر	خیر
Khanchehzarrin et al., 2022	مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی با ریسک تأمین	ندارد	خیر	بله	بله
Farzaneh et al., 2023	هماهنگی ارزیابی خسارت، بازیابی جاده و توزیع امداد	ندارد	بله	خیر	خیر
Hu et al., 2024	مکان‌یابی-مسیریابی تسهیلات اضطراری با رویکرد ریسک‌گریز	تصادفی	بله	خیر	بله
Temiz et al., 2025	مکان‌یابی-مسیریابی احتمالی با بسته‌شدن جاده‌ها	احتمالی	خیر	بله	بله
پژوهش حاضر	مکان‌یابی-مسیریابی فازی با بازیابی سناریومحور شبکه	فازی مثلثی	بله	بله	بله

۲-۴- مقایسه مطالعات منتخب

مرور ادبیات نشان می‌دهد ترکیب تقاضای فازی، تغییرات دوره‌ای دسترسی شبکه و تصمیم‌های یکپارچه مکان‌یابی-مسیریابی کمتر بررسی شده است. پژوهش حاضر این شکاف را با ارائه مدلی چندهدفه و چنددوره‌ای و یک روش حل مسئله‌محور مبتنی بر NSGA-II پوشش می‌دهد. مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات منتخب در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- مدل ریاضی

شبکه حمل‌ونقل پس از بحران به‌صورت گراف جهت‌دار $G = (N, E)$ تعریف می‌شود که در آن $N = I \cup J \cup H$ است. مجموعه‌های I، J و H به‌ترتیب مناطق آسیب‌دیده یا گره‌های تقاضا، مکان‌های نامزد احداث انبارهای امدادی و گره‌های ارتباطی شبکه را نشان می‌دهند. همچنین، E مجموعه یال‌های جهت‌دار، $T = \{1, \dots, |T|\}$ مجموعه دوره‌های زمانی و K مجموعه وسایل نقلیه امدادی است.

در هر دوره، هر وسیله نقلیه حداکثر به یک انبار فعال تخصیص می‌یابد، مسیر خود را از همان انبار آغاز می‌کند و در پایان به همان انبار بازمی‌گردد. ناوگان همگن است و تقسیم تقاضای یک منطقه میان چند وسیله نقلیه یا چند انبار مجاز است. تقاضای مناطق به‌صورت فازی مثلثی تعریف می‌شود و تقاضای تأمین‌نشده در پایان هر دوره به دوره بعد انتقال می‌یابد. ظرفیت انبارها، ظرفیت وسایل نقلیه، عرضه دوره‌ای انبارها و ظرفیت عبور یال‌ها محدود است. عرضه ورودی هر انبار در هر دوره، مستقل و برون‌زا است و تنها در صورت فعال‌بودن آن انبار قابل‌استفاده خواهد بود. وضعیت شبکه در طول افق برنامه‌ریزی ثابت نیست و سطح عملکرد و قابلیت تردد یال‌ها می‌تواند در دوره‌های مختلف تغییر کند. سناریوی بازیابی شبکه برون‌زا و از پیش تعیین شده است؛ بنابراین، مدل زمان تعمیر یا بازگشایی یال‌ها را تعیین نمی‌کند، بلکه تصمیم‌های لجستیکی را با توجه به وضعیت شبکه در هر دوره اتخاذ می‌کند.

۳-۱- پارامترهای مدل

$\tilde{d}_{it} = (d_{it}^L, d_{it}^M, d_{it}^U)$ تقاضای فازی مثلثی منطقه i در دوره t است، که در آن d_{it}^L، d_{it}^M و d_{it}^U به‌ترتیب حد پایین، مقدار محتمل و حد بالای تقاضا می‌باشد.

D_{it}	تقاضای قطعی معادل منطقه i در دوره t
Cap_j	حداکثر ظرفیت انبار j
Q	ظرفیت حمل هر وسیله نقلیه
f_j	هزینه ثابت فعال‌سازی انبار j
c_{uv}	هزینه عبور یک وسیله نقلیه از یال (u,v)
τ_{uv}	زمان پایه سفر روی یال (u,v)
α_{uvt}	سطح عملکرد یال (u,v) در دوره t، طوری‌که $\varepsilon \le \alpha_{uvt} \le 1$ (مقدار بزرگ‌تر α_{uvt} نشان‌دهنده وضعیت بهتر مسیر)
Ω_{uvt}	برابر یک اگر یال (u,v) در دوره t قابل تردد باشد؛ در غیر این صورت صفر
$Supply_{jt}$	مقدار عرضه ورودی به انبار j در دوره t
I_{j0}^0	موجودی اولیه در دسترس انبار j
p_i	جریمه اقتصادی هر واحد تقاضای تأمین‌نشده در منطقه i
RC_{uvt}	حداکثر تعداد وسایل نقلیه قابل عبور از یال (u,v) در دوره t
T^{ref}, B^{ref}	مقادیر مرجع مثبت برای نرمال‌سازی زمان سفر مؤثر و کمبود انباشته
w_T, w_B	وزن مؤلفه زمان سفر و مؤلفه کمبود در تابع هدف نخست

۳-۲- متغیرهای تصمیم

$x_j \in \{0,1\}$	برابر ۱ اگر انبار j فعال شود؛ در غیر این صورت برابر صفر
$a_{jtk} \in \{0,1\}$	برابر ۱ اگر وسیله نقلیه k در دوره t به انبار j تخصیص یابد؛ در غیر این صورت برابر صفر
$y_{uvtk} \in \{0,1\}$	برابر ۱ اگر وسیله نقلیه k در دوره t از یال (u,v) عبور کند؛ در غیر این صورت برابر صفر
$v_{ntk} \in \{0,1\}$	برابر ۱ اگر وسیله نقلیه k در دوره t گره غیرانبار n را بازدید کند؛ در غیر این صورت برابر صفر
$q_{jitk} \ge 0$	مقدار کالای تحویلی از انبار j به منطقه i، توسط وسیله نقلیه k در دوره t
$I_{jt} \ge 0$	موجودی انبار j در پایان دوره t
$B_{it} \ge 0$	کمبود انباشته منطقه i در پایان دوره t
$s_{ntk} \ge 0$	متغیر کمکی برای تعیین ترتیب بازدید و حذف زیرمسیر

۳-۳- فازی‌زدایی تقاضا

تقاضای قطعی معادل با استفاده از روش ارزش مورد انتظار محاسبه می‌شود (Jiménez et al., 2007):

$$D_{it} = \frac{(d_{it}^{L} + 2d_{it}^{M} + d_{it}^{U})}{4}, \quad \forall i \in I, t \in T \qquad (۱)$$

۳-۴- توابع هدف مدل

تابع هدف نخست، ترکیب نرمال‌شده زمان سفر مؤثر و کمبود انباشته را کمینه می‌کند:

$$\min Z_1 = w_T \frac{\sum_{t\in T}\sum_{k\in K}\sum_{(u,v)\in E}\frac{\tau_{uv}}{\alpha_{uvt}} y_{uvtk}}{T^{ref}} + w_B \frac{\sum_{t\in T}\sum_{i\in I} t\, B_{it}}{B^{ref}} \qquad (۲)$$

$$w_T + w_B = 1, \qquad w_T, w_B \geq 0 \qquad (۳)$$

تابع هدف دوم، هزینه‌های فعال‌سازی انبارها، حمل‌ونقل و کمبود را کمینه می‌کند:

$$\min Z_2 = \sum_{j\in J} f_j\, x_j + \sum_{t\in T}\sum_{k\in K}\sum_{(u,v)\in E} c_{uv}\, y_{uvtk} + \sum_{t\in T}\sum_{i\in I} p_i\, B_{it} \qquad (۴)$$

در هدف نخست، کمبود به‌عنوان معیار سطح خدمت بشردوستانه و در هدف دوم، پیامد اقتصادی عدم تأمین تقاضا در نظر گرفته می‌شود. از آنجاکه پارامترهای α_{uvt}، T^{ref} و B^{ref} ثابت می‌باشند، هر دو تابع هدف خطی هستند.

۳-۵- محدودیت‌های مدل

توازن تقاضا و انتقال کمبود به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_{it} = B_{i,t-1} + D_{it} - \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} q_{jitk}, \quad \forall i \in I, t \in T \qquad (۵)$$

$$B_{i0} = 0, \quad \forall i \in I \qquad (۶)$$

روابط موجودی اولیه، توازن موجودی و ظرفیت انبار عبارتند از:

$$I_{j0} = I_{j0}^{0} x_j, \quad \forall j \in J \qquad (۷)$$

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + Supply_{jt} x_j - \sum_{i\in I}\sum_{k\in K} q_{jitk}, \quad \forall j \in J, t \in T \qquad (۸)$$

$$0 \leq I_{jt} \leq Cap_j x_j, \quad \forall j \in J, t \in T \qquad (۹)$$

رابطه (۷) مقدار موجودی اولیه در دسترس را به فعال‌سازی انبار وابسته می‌کند و رابطه (۸) توازن موجودی هر دوره را برقرار می‌سازد.

هر وسیله نقلیه در هر دوره حداکثر به یک انبار فعال تخصیص می‌یابد:

$$\sum_{j\in J} a_{jtk} \leq 1, \qquad \forall t \in T, k \in K \qquad (۱۰)$$

$$a_{jtk} \leq x_j, \qquad \forall j \in J, t \in T, k \in K \qquad (۱۱)$$

شروع و پایان مسیر در انبار تخصیص‌یافته با روابط زیر تضمین می‌شود:

$$\sum_{\substack{v\in N\\(j,v)\in E}} y_{jvtk} = a_{jtk}, \quad \forall j \in J, t \in T, k \in K \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{\substack{u\in N\\(u,j)\in E}} y_{ujtk} = a_{jtk}, \quad \forall j \in J, t \in T, k \in K \qquad (۱۳)$$

تعادل جریان در گره‌های غیرانبار به‌صورت زیر برقرار می‌شود:

$$\sum_{\substack{u\in N\\(u,n)\in E}} y_{untk} = v_{ntk}, \quad \forall n \in I \cup H, t \in T, k \in K \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{\substack{v\in N\\(n,v)\in E}} y_{nvtk} = v_{ntk}, \quad \forall n \in I \cup H, t \in T, k \in K \qquad (۱۵)$$

ظرفیت وسیله نقلیه و ارتباط مقدار تحویل با بازدید منطقه و انبار مبدأ به‌ترتیب از روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\sum_{j\in J}\sum_{i\in I} q_{jitk} \leq Q \sum_{j\in J} a_{jtk}, \quad \forall t \in T, k \in K \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j\in J} q_{jitk} \leq Q v_{itk}, \qquad \forall i \in I, t \in T, k \in K \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{i\in I} q_{jitk} \leq Q a_{jtk} \qquad \forall j \in J, t \in T, k \in K \qquad (۱۸)$$

قابلیت تردد و ظرفیت عبور یال‌ها با محدودیت زیر اعمال می‌شود:

$$\sum_{k\in K} y_{uvtk} \leq RC_{uvt}\Omega_{uvt}, \forall (u,v) \in E, t \in T \qquad (۱۹)$$

با تعریف تعداد گره‌های غیرانبار به‌صورت $M_N = |I \cup H|$، قیود حذف زیرمسیر از نوع میلر-تاکر-زملین (MTZ) به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$s_{ntk} - s_{mtk} + M_N y_{nmtk} \le M_N - 1, \quad \forall n,m \in I \cup H, n \ne m, (n,m) \in E, \quad t \in T, k \in K \tag{۲۰}$$

$$v_{ntk} \le s_{ntk}, \quad \forall n \in I \cup H, t \in T, k \in K \tag{۲۱}$$

$$s_{ntk} \le M_N v_{ntk}, \quad \forall n \in I \cup H, t \in T, k \in K \tag{۲۲}$$

این روابط از تشکیل زیرمسیرهای مستقل از انبار جلوگیری می‌کنند.

مدل نهایی به‌صورت $\min(Z_1, Z_2)$، با رعایت محدودیت‌های (۵) تا (۲۲) و دامنه متغیرهای مندرج در بخش ۲-۳، تعریف می‌شود.

۴- الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر NSGA-II

مدل ارائه‌شده یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه است که با افزایش تعداد گره‌ها، خودروها و دوره‌ها به‌سرعت پیچیده می‌شود. از این‌رو، برای حل نمونه‌های متوسط و بزرگ، نسخه‌ای مسئله‌محور از الگوریتم NSGA-II توسعه یافت. این الگوریتم با استفاده از مرتب‌سازی نامغلوب، فاصله ازدحام و نخبه‌گرایی، مجموعه‌ای از جواب‌های مصالحه‌ای میان اهداف مدل تولید می‌کند (Deb et al., 2002).

۴-۱- ساختار کروموزوم

هر کروموزوم به‌صورت $C = (X, A, R)$ تعریف می‌شود. بخش $X = (x_1, x_2, \dots, x_{|J|})$ بردار دودویی انبارهای فعال است؛ به‌طوری‌که $x_j = 1$، نشان‌دهنده فعال‌بودن انبار j است. بخش $A = (a_{tk})_{t\in T, k\in K}$ انبار مبدأ هر وسیله نقلیه را در هر دوره مشخص می‌کند؛ مقدار $a_{tk} = j$ به معنای تخصیص وسیله نقلیه k در دوره t به انبار j و مقدار صفر بیانگر غیرفعال بودن وسیله نقلیه است. بخش R نیز شامل توالی مناطق تقاضای بازدیدشده توسط هر خودرو در هر دوره است.

گره‌های ارتباطی شبکه در کروموزوم ذخیره نمی‌شوند، بلکه هنگام رمزگشایی با محاسبه کوتاه‌ترین مسیر قابل‌تردد میان نقاط متوالی به مسیر افزوده می‌شوند. این نمایش مسیرمحور، در مقایسه با ذخیره مستقیم متغیرهای دودویی تمام یال‌ها، طول کروموزوم و احتمال تولید مسیرهای نامعتبر را کاهش می‌دهد.

۴-۲- رمزگشایی و ارزیابی کروموزوم

در مرحله رمزگشایی، مقادیر x_j و a_{jtk} مستقیماً از بخش‌های X و A استخراج می‌شوند. سپس برای هر زوج (t,k)، مسیر بسته‌ای از انبار تخصیص‌یافته، توالی مناطق موجود در R_{tk} و مسیر بازگشت به همان انبار تشکیل می‌شود. اتصال میان نقاط متوالی با کوتاه‌ترین مسیر در زیرشبکه قابل‌تردد دوره t تعیین می‌شود.

اگر خودرو در دوره t از یال (u,v) عبور کند، $y_{uvtk} = 1$

اگر منطقه i در توالی بازدید این خودرو قرار داشته باشد، $v_{itk} = 1$ در نظر گرفته می‌شود.

پس از تثبیت تصمیم‌های مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی، متغیرهای پیوسته I_{jt}، q_{jitk} و B_{it} از طریق یک زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی تعیین می‌شوند. تابع هدف این زیرمسئله کمینه‌سازی کمبود انباشته وزن‌دهی‌شده زمانی است:

$$\min \sum_{t\in T} \sum_{i\in I} t\, B_{it} \tag{۲۳}$$

در این زیرمسئله، قیود توازن موجودی و کمبود، ظرفیت خودرو و انبار و پیوند تحویل با بازدید و انبار مبدأ، مطابق مدل بخش ۳ اعمال می‌شوند. سپس مقادیر Z_1 و Z_2 با استفاده از جواب زیرمسئله محاسبه می‌گردند. اگر مسیر بسته قابل‌تردد تشکیل نشود، ظرفیت یال نقض شود یا زیرمسئله خطی فاقد جواب شدنی باشد، کروموزوم ناممکن تلقی و با مقادیر جریمه‌شده ارزیابی می‌شود.

۴-۳- تولید جمعیت اولیه

به‌منظور ایجاد توازن میان کیفیت و تنوع، نیمی از جمعیت اولیه به روش ابتکاری و نیم دیگر به روش تصادفی کنترل‌شده تولید می‌شود. در روش ابتکاری، انبارهای نامزد براساس پوشش تقاضا، ظرفیت و فاصله مؤثر تا مناطق تقاضا امتیازدهی می‌شوند. پس از نرمال‌سازی مؤلفه‌ها، امتیاز انبار j به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Score}_j = \text{Coverage}_j + \text{Capacity}_j - \text{Distance}_j \tag{۲۴}$$

سپس یکی از انبارهای دارای امتیاز بالاتر انتخاب می‌شود و مناطق قابل‌دسترسی با توجه به تقاضای جاری و انباشته، فاصله مؤثر و ظرفیت خودروها میان مسیرها

توزیع می‌شوند. ترتیب بازدید هر مسیر نیز با قاعده نزدیک‌ترین همسایه تعیین می‌گردد.

در روش تصادفی کنترل‌شده، یک انبار از میان انبارهای مناسب به‌صورت تصادفی انتخاب و خودروها و مناطق قابل‌دسترسی با حفظ ساختار کلی مسیر میان آن‌ها توزیع می‌شوند. برای پشتیبانی از تحویل تفکیکی، بازدید یک منطقه توسط خودروهای مختلف مجاز است. پس از تولید هر کروموزوم، رویه اصلاح و زیرمسئله خطی اجرا می‌شود. جواب‌های ناممکن یا کاملاً تکراری، تا حد امکان، با جواب جدید جایگزین می‌شوند.

۴-۴- عملگرهای ژنتیکی

والدین با استفاده از مسابقه دوتایی انتخاب می‌شوند. ابتدا جواب دارای رتبه نامغلوب کمتر و در صورت برابری رتبه، جواب دارای فاصله ازدحام بیشتر انتخاب می‌شود. اگر هر دو معیار برابر باشند، انتخاب به‌صورت تصادفی انجام می‌گیرد.

با توجه به ساختار چندبخشی کروموزوم، برای هر بخش عملگر تقاطع متناسب به کار می‌رود. برای بردار مکان‌یابی X و ساختار تخصیص A، تقاطع یکنواخت استفاده می‌شود. برای توالی‌های مسیریابی نیز تقاطع ترتیبی OX به کار می‌رود؛ مشروط بر آنکه دو مسیر متناظر دارای طول و مجموعه مناطق یکسان باشند. در غیر این صورت، مسیر والد بدون تغییر به فرزند منتقل و سازگاری آن در مرحله اصلاح کنترل می‌شود.

جهش بخش مکان‌یابی با معکوس‌کردن ژن‌های X انجام می‌شود؛ با این محدودیت که حداقل یک انبار فعال باقی بماند. در بخش تخصیص، انبار مبدأ یک خودرو به انبار فعال دیگری تغییر می‌کند. برای بخش مسیریابی نیز سه عملگر درون مسیر شامل جابه‌جایی دو منطقه (Swap)، انتقال یک منطقه به موقعیت دیگر همان مسیر (Relocate) و معکوس‌کردن یک زیرتوالی (Inversion) استفاده می‌شود. علاوه بر این، در الگوریتم پیشنهادی دو جهش مسئله‌محور به کار می‌رود. در انتقال بین‌خودرویی، یک منطقه میان مسیر دو خودرو در یک دوره جابه‌جا می‌شود و در انتقال بین‌دوره‌ای، بازدید یک منطقه از یک دوره به دوره‌ای دیگر منتقل می‌گردد. این دو عملگر امکان تغییر ساختار تخصیص خدمت را فراهم می‌کنند، درحالی‌که سه جهش نخست عمدتاً ترتیب بازدید را تغییر می‌دهند. شدنی‌بودن تغییرات ایجادشده پس از جهش با رویه اصلاح و زیرمسئله خطی کنترل می‌شود.

۴-۵- رویه اصلاح

برای کاهش تعداد جواب‌های ناممکن، پس از اجرای عملگرهای ژنتیکی رویه اصلاح زیر اعمال می‌شود:

۱) اگر هیچ انباری فعال نباشد، انبار دارای بیشترین ظرفیت فعال می‌شود.

۲) تخصیص خودرو به انبار غیرفعال به یکی از انبارهای فعال منتقل می‌شود. اگر خودرویی مسیر نداشته باشد، تخصیص آن صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳) بازدیدهای تکراری یک منطقه در مسیر همان خودرو و دوره حذف می‌شوند؛ با این وجود، بازدید یک منطقه توسط خودروهای مختلف، به‌دلیل مجازبودن تحویل تفکیکی، حفظ می‌شود.

۴) برای هر دوره، قابلیت تردد مسیر میان نقاط متوالی بررسی و کوتاه‌ترین مسیر قابل‌تردد محاسبه می‌شود. بازدیدهای غیرقابل‌دسترسی حذف می‌شوند و اگر مسیر بسته‌ای از انبار و به همان انبار قابل تشکیل نباشد، خودرو در آن دوره غیرفعال می‌شود.

۵) بار عبوری یال‌ها محاسبه می‌شود. در صورت نقض ظرفیت یک یال، مسیر دارای بیشترین مشارکت در اضافه‌بار غیرفعال می‌شود. این فرایند تا رفع اضافه‌بار ادامه می‌یابد.

۶) در پایان، زیرمسئله خطی برای تعیین تحویل، موجودی و کمبود حل می‌شود. در صورت ناممکن‌بودن زیرمسئله، کروموزوم با جریمه ارزیابی می‌گردد.

۴-۶- مرتب‌سازی نامغلوب و تشکیل نسل بعد

با توجه به کمینه‌سازی هر دو تابع هدف، جواب a بر جواب b غالب است اگر:

$$Z_m(a) \le Z_m(b), \qquad \forall m \in \{1,2\} \qquad (۲۵)$$

و حداقل در یکی از اهداف نابرابری اکید برقرار باشد. جمعیت براساس این رابطه به جبهه‌های نامغلوب تقسیم

می‌شود. برای حفظ پراکندگی جواب‌ها، فاصله ازدحام هر عضو با استفاده از فاصله نرمال‌شده آن از جواب‌های مجاور در فضای اهداف محاسبه می‌شود و برای نقاط مرزی هر جبهه مقدار نامتناهی در نظر گرفته می‌شود.

در هر نسل، جمعیت والد P_g و جمعیت فرزند Q_g ترکیب می‌شوند: $R_g = P_g \cup Q_g$، جبهه‌های نامغلوب R_g به‌ترتیب به جمعیت نسل بعد افزوده می‌شوند. اگر یک جبهه به‌طور کامل در ظرفیت باقی‌مانده جمعیت قرار نگیرد، اعضای آن براساس فاصله ازدحام نزولی مرتب و فقط تعداد موردنیاز انتخاب می‌شوند. این سازوکار موجب حفظ نخبه‌گرایی و تنوع جواب‌ها می‌شود.

۴-۷- شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی

ورودی: داده‌های مدل، اندازه جمعیت N_P، تعداد نسل G_{max}، احتمال تقاطع p_c، احتمال جهش p_m و بذر تصادفی

خروجی: مجموعه جواب‌های نامغلوب نهایی

۱) تقاضای فازی را قطعی‌سازی و پارامترهای دوره‌ای شبکه را محاسبه کنید.

۲) جمعیت اولیه را با نسبت مساوی از روش‌های ابتکاری و تصادفی کنترل‌شده تولید کنید.

۳) روی هر عضو، مراحل اصلاح، رمزگشایی، حل زیرمسئله LP و ارزیابی اهداف را اجرا کنید.

۴) مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحام جمعیت را محاسبه کنید.

۵) برای $g = 1, \dots, G_{max}$ مراحل زیر را انجام دهید:

- والدین را با مسابقه دوتایی انتخاب کنید.
- با احتمال p_c، تقاطع متناسب با هر بخش را اجرا کنید.
- با احتمال p_m، جهش‌های استاندارد و مسئله‌محور را اعمال کنید.
- فرزندان را اصلاح، رمزگشایی و ارزیابی کنید.
- جمعیت والد و فرزند را ادغام کنید.
- نسل بعد را براساس رتبه نامغلوب و فاصله ازدحام تشکیل دهید.

۶) جواب‌های نامغلوب و غیرتکراری جمعیت نهایی را استخراج کنید.

شرط توقف، رسیدن به تعداد نسل ازپیش‌تعیین‌شده است. استفاده از شرط ثابت برای تمام اجراها، امکان مقایسه منصفانه الگوریتم‌ها را فراهم می‌کند. تعداد اجراهای مستقل، بذرها، اندازه جمعیت، تعداد نسل، احتمال تقاطع و جهش و شاخص‌های ارزیابی در بخش طراحی آزمایش‌ها گزارش می‌شوند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- طراحی آزمایش‌ها و آماده‌سازی داده‌ها

برای ارزیابی مدل و الگوریتم پیشنهادی، از ۱۰ نمونه مجموعه داده MDDVRPSRC استفاده شد. از آنجا که داده‌های اصلی شامل تمام پارامترهای مدل حاضر نیستند، پارامترهای مربوط به تقاضای فازی، ساختار چنددوره‌ای، بازیابی شبکه، موجودی، عرضه و هزینه‌ها مطابق روابط این بخش تولید شدند. مختصات گره‌ها، ساختار شبکه، شدت آسیب و ظرفیت یال‌ها نیز مستقیماً از نمونه‌های معیار استخراج شدند.

۵-۱-۱- مشخصات نمونه‌های معیار

در نام نمونه‌ها، D، N و S به‌ترتیب تعداد انبارهای نامزد، گره‌های ارتباطی و مناطق تقاضا را نشان می‌دهند. مشخصات نمونه‌ها در **جدول ۲** ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های معیار MDDVRPSRC

Table 2. Benchmark instance specifications for MDDVRPSRC

نمونه	انبار	منطقه تقاضا	گره ارتباطی	کل گره‌ها	تقاضای پایه
D3N8S3	۳	۳	۸	۱۴	۵۵۰
D4N11S4	۴	۴	۱۱	۱۹	۵۵۰
D4N30S10	۴	۱۰	۳۰	۴۴	۱۶۵۰
D5N13S5	۵	۵	۱۳	۲۳	۶۵۰
D6N16S6	۶	۶	۱۶	۲۸	۹۵۰
D7N18S7	۷	۷	۱۸	۳۲	۱۲۵۰
D8N20S8	۸	۸	۲۰	۳۶	۱۳۵۰
D8N22S9	۸	۹	۲۲	۳۹	۱۶۰۰
D9N25S10	۹	۱۰	۲۵	۴۴	۱۶۵۰
D9N30S10	۹	۱۰	۳۰	۴۹	۱۶۵۰

تمام نمونه‌ها برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده شدند.

۵-۱-۲- فاصله، زمان و هزینه سفر

فاصله اقلیدسی یال (u,v)، با استفاده از مختصات گره‌ها، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Dist_{uv} = \sqrt{(X_u - X_v)^2 + (Y_u - Y_v)^2} \quad (۲۶)$$

با فرض سرعت پایه ۹۰ کیلومتر بر ساعت، زمان سفر پایه برحسب دقیقه برابر است با:

$$\tau_{uv} = \frac{60 Dist_{uv}}{90} \quad (۲۷)$$

برای کاهش وابستگی هزینه‌ها به مقیاس مختصات، فاصله یال‌ها نسبت به میانگین فاصله شبکه نرمال شد:

$$\widehat{Dist_{uv}} = \frac{Dist_{uv}}{\frac{1}{|E|}\sum_{(r,s)\in E} Dist_{rs}}, \qquad c_{uv} = c^{unit}\widehat{Dist_{uv}} \quad (۲۸)$$

در آزمایش‌های اصلی، $c^{unit} = 1$ در نظر گرفته شد.

۵-۱-۳- تقاضای چنددوره‌ای و فازی

اگر F_t نسبت تجمعی ورود تقاضا تا پایان دوره t باشد، سهم مستقل تقاضای دوره از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varphi_t = F_t - F_{t-1}, \qquad F_0 = 0 \quad (۲۹)$$

و تقاضای پایه منطقه i در دوره t برابر است با:

$$d_{it} = \varphi_t d_i, \qquad \forall\, i \in I, t \in T \quad (۳۰)$$

الگوهای تجمعی ورود تقاضا در **جدول ۳** ارائه شده‌اند. در الگوهای کند و متوسط، به‌ترتیب ۵۰ و ۸۵ درصد تقاضای کل تا پایان افق چهاردوره‌ای وارد سیستم می‌شود؛ بنابراین، این دو الگو بیانگر افق ورود ناقص تقاضا هستند. در آزمایش پایه، از الگوی سریع استفاده شد که در آن تمام تقاضا تا پایان دوره چهارم وارد سیستم می‌شود.

جدول ۳. الگوهای تجمعی ورود تقاضا

Table 3. Cumulative demand arrival patterns

الگو	F_1	F_2	F_3	F_4
کند	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۵۰
متوسط	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۶۰	۰/۸۵
سریع	۰/۰۰	۰/۵۰	۰/۸۰	۱/۰۰

عدم‌قطعیت تقاضا با عدد فازی مثلثی زیر نمایش داده شد:

$$\tilde{d}_{it} = [(1-\delta^-)d_{it}, d_{it}, (1+\delta^+)d_{it}] \quad (۳۱)$$

سپس تقاضای قطعی معادل، مطابق رابطه فازی‌زدایی بخش ۳-۳، محاسبه شد.

سطوح عدم‌قطعیت در **جدول ۴** آمده است.

جدول ۴. سطوح عدم‌قطعیت تقاضا

Table 4. Demand uncertainty levels

سطح	δ^-	δ^+
پایین	۰/۰۵	۰/۱۰
پایه	۰/۱۰	۰/۲۰
بالا	۰/۱۵	۰/۳۰

۵-۱-۴- آسیب و بازیابی شبکه

شدت آسیب هر یال نسبت به بیشترین آسیب همان نمونه نرمال شد:

$$A_{uv}^{norm} = \frac{Damage_{uv}}{\max\limits_{(r,s)\in E} Damage_{rs}}, \qquad 0 \le A_{uv}^{norm} \le 1 \quad (۳۲)$$

اگر تمام یال‌ها بدون آسیب باشند، مقدار نرمال‌شده همه یال‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود.

برای مدل‌سازی بازگشایی شبکه، سه سناریوی کند، متوسط و سریع تعریف شد. برای تعیین ρ_{st}، از سه پروفایل تجمعی عددی جدول ۳ استفاده شد؛ با این تفاوت که این مقادیر در این بخش سطح تجمعی بازیابی شبکه را نشان می‌دهند. انتخاب الگوی ورود تقاضا و سناریوی بازیابی شبکه مستقل از یکدیگر انجام شد. همچنین، $\rho_{s,t+1} \ge \rho_{st}$ است.

قابلیت تردد یال (u,v) در دوره t و سناریوی s از رابطه زیر تعیین شد:

$$\Omega_{uvt}^{s} = \begin{cases} 1 & A_{uv}^{norm} \le \rho_{st} \\ 0 & A_{uv}^{norm} > \rho_{st} \end{cases} \quad (۳۳)$$

بنابراین، بازگشایی شبکه غیرکاهشی است: $\Omega_{uv,t+1}^{s} \ge \Omega_{uvt}^{s}$. برای یال‌های قابل‌تردد، سطح عملکرد و زمان مؤثر سفر به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه شدند:

$$\alpha_{uvt}^{s} = \max\{\varepsilon, 1 - A_{uv}^{norm}(1-\rho_{st})\} \quad (۳۴)$$

$$\tau_{uvt}^{effs} = \frac{\tau_{uv}}{\alpha_{uvt}^{s}} \quad (۳۵)$$

در آزمایش‌ها، $\varepsilon = 0.05$ در نظر گرفته شد. هر سناریو به‌صورت مستقل اجرا و مقادیر Ω_{uvt}^{s} و α_{uvt}^{s} به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند.

۵-۱-۵- ناوگان، ظرفیت، موجودی و هزینه‌ها

ظرفیت هر خودرو برابر $Q = 50$ در نظر گرفته شد. کران پایین تعداد خودروها براساس ظرفیت کل ناوگان از رابطه زیر محاسبه شد:

$$K^{min} = \left\lceil \frac{\sum_{i\in I}\sum_{t\in T} D_{it}}{Q|T|} \right\rceil \quad (۳۶)$$

این رابطه تنها یک کران ظرفیت‌محور است و محدودیت‌های دسترسی و مسیریابی را در نظر نمی‌گیرد. ازاین‌رو، تعداد خودروهای داده معیار حفظ شد و فقط در صورتی افزایش یافت که از K^{min} کمتر بود.

ظرفیت انبارها، موجودی اولیه و عرضه دوره‌ای به‌ترتیب از روابط زیر تعیین شدند:

$$Cap_j = \frac{\gamma \sum_{i\in I}\sum_{t\in T} D_{it}}{|J|} \quad (۳۷)$$

$$I_{j0}^{0} = \theta Cap_j \quad (۳۸)$$

$$Supply_{jt} = \lambda \sum_{i\in I} D_{it} \quad (۳۹)$$

در آزمایش پایه، مقادیر $\gamma = 0.60$، $\theta = 0.30$ و $\lambda = 0.50$ استفاده شدند. هزینه ثابت انبار و جریمه کمبود نیز نسبت به میانگین هزینه یال‌ها تعیین شدند:

$$\bar{c} = \frac{1}{|E|}\sum_{(u,v)\in E} c_{uv} \quad (۴۰)$$

$$f_j = \eta^{fix}\bar{c}, \qquad p_i = \eta^{short}\bar{c} \quad (۴۱)$$

که در آن $\eta^{fix} = 20$ و $\eta^{short} = 5$ است.

کران متغیرها و ثابت مورد استفاده در قیود حذف زیرمسیر مطابق روابط بخش ۳ تعیین شدند.

۵-۲- تنظیمات آزمایش‌های محاسباتی

آزمایش پایه با افق چهاردوره‌ای، الگوی سریع ورود تقاضا، سطح پایه عدم‌قطعیت و سناریوی متوسط بازیابی شبکه انجام شد. الگوریتم پیشنهادی برای هر نمونه در ۲۰ اجرای مستقل با بذرهای تصادفی ۰ تا ۱۹ در محیط Python 3.11 با استفاده از سیستمی مجهز به پردازنده Intel Core i9-12900K و ۳۲ گیگابایت حافظه RAM اجرا شد.

پارامترهای NSGA-II پیش از اجرای آزمایش‌های اصلی و طی اجراهای مقدماتی تعیین شدند. اندازه جمعیت و تعداد نسل پس از بررسی رفتار همگرایی و پایداری کیفیت جبهه نامغلوب، به‌ترتیب ۴۰ و ۶۰ انتخاب شدند. احتمال تقاطع برای حفظ نرخ بالای بازترکیب در کروموزوم چندبخشی برابر ۰/۹ تعیین شد. برای احتمال جهش، مقادیر ۰/۱ و ۰/۲ در نمونه‌های منتخب و براساس شاخص‌های HV و IGD+ ارزیابی و مقدار ۰/۱ انتخاب شد. سهم جواب‌های ابتکاری در جمعیت اولیه ۵۰ درصد بود و رسیدن به تعداد نسل تعیین‌شده به‌عنوان معیار توقف در نظر گرفته شد. پس از این مرحله، تنظیمات الگوریتم تثبیت و بدون تغییر در تمام نمونه‌ها به کار گرفته شدند؛ نتایج اجراهای مقدماتی نیز در محاسبه آمار گزارش‌شده منظور نشدند.

مقادیر مرجع T^{ref} و B^{ref} با استفاده از اجراهای کالیبراسیون مستقل تعیین و سپس در تمام اجراهای مقایسه‌ای ثابت نگه داشته شدند. برای هر اجرا، جبهه نامغلوب نهایی، تعداد جواب‌های نامغلوب[1]، شاخص‌های Hypervolume (HV)، IGD+[2] و Spacing و زمان محاسباتی ثبت شد (Zitzler et al., 2003).

پیش از محاسبه شاخص‌های HV و IGD+، مقادیر هر دو تابع هدف در هر مجموعه آزمایشی با استفاده از کران‌های کمینه و بیشینه حاصل از اجتماع تمام جواب‌های همان تحلیل به بازه [0,1] نگاشت شدند. این کران‌ها برای تمامی جبهه‌ها یکسان بودند و جبهه مرجع تجربی IGD+ نیز با همان کران‌ها نرمال‌سازی شد. در مقایسه دو الگوریتم، اجتماع مذکور شامل جواب‌های تمام اجراهای هر دو روش بود؛ بنابراین، نرمال‌سازی و جبهه مرجع برای دو روش کاملاً مشترک بودند. شاخص HV در فضای اهداف نرمال‌شده و نسبت به نقطه مرجع ثابت (1.1,1.1) محاسبه شد. این نقطه با هدف ایجاد حاشیه‌ای ثابت و ۱۰ درصدی فراتر از کران بالای فضای نرمال‌شده انتخاب و برای تمام اجراها و روش‌های مورد مقایسه یکسان نگه داشته شد (Ishibuchi et al., 2017). مقدار گزارش‌شده بر مساحت جعبه مرجع تقسیم نشده است. ازآنجاکه نقاط

[1] Non-dominated Solutions (ND)
[2] Inverted Generational Distance Plus

نرمال‌شده در بازه $[0,1]^2$ قرار دارند، کران بالای هندسی مساحت غالب‌شده برابر $1.1 \times 1.1 = 1.21$ است؛ ازاین‌رو، مقدار گزارش‌شده HV الزاماً به یک محدود نیست. نتایج شاخص‌ها به‌صورت میانگین و انحراف معیار ۲۰ اجرا گزارش شدند.

۵-۳- نتایج محاسباتی

نتایج ۲۰ اجرای مستقل الگوریتم پیشنهادی برای نمونه‌های معیار در **جدول ۵** گزارش شده‌اند. مقادیر جدول شامل میانگین تعداد جواب‌های نامغلوب، میانگین بهترین مقدار هر یک از توابع هدف، شاخص‌های کیفیت جبهه نامغلوب و زمان اجرای الگوریتم در ۲۰ اجرا هستند. الگوریتم پیشنهادی در تمام نمونه‌ها مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب تولید کرد و میانگین ND بین ۳/۱۵ و ۸/۰۵ بود. بیشترین تعداد جواب نامغلوب در D9N30S10 و پس از آن در D4N30S10 مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد الگوریتم توانسته است برای این نمونه‌ها گزینه‌های مصالحه‌ای متنوع‌تری ایجاد کند؛ هرچند ND به تنهایی بیانگر کیفیت یا همگرایی جبهه نیست.

در میان نتایج، D4N30S10 دارای بیشترین HV برابر ۰/۹۰۹۰۳ و کمترین +IGD برابر ۰/۱۳۴۹۳ بود. نمونه‌های D9N30S10 و D9N25S10 نیز مقادیر HV بالاتر از ۰/۹۰ داشتند. همچنین، +IGD نمونه D9N30S10 برابر ۰/۱۳۹۰۵ به دست آمد. مقادیر بالاتر HV نشان‌دهنده پوشش و گستردگی بهتر فضای هدف و مقادیر کمتر +IGD بیانگر نزدیکی بیشتر جواب‌ها به جبهه مرجع

جدول ۵. میانگین نتایج الگوریتم پیشنهادی

Table 5. Average results of the proposed algorithm

نمونه	ND	Z_1	Z_2	HV	IGD+	Spacing	زمان (ثانیه)
D3N8S3	۳/۳۵	۰/۴۲۴۸۵	۱۲۷۵/۱۱	۰/۶۳۸۴۱	۰/۴۷۴۳۹	۰/۰۳۰۲۵	۱۳/۱۱
D4N11S4	۴/۶۵	۰/۵۳۵۶۶	۱۵۳۶/۰۵	۰/۵۱۴۷۷	۰/۵۳۷۹۶	۰/۰۶۲۵۵	۱۳/۴۱
D4N30S10	۷/۷۵	۰/۷۹۸۲۲	۸۹۹۰/۰۹	۰/۹۰۹۰۳	۰/۱۳۴۹۳	۰/۰۶۶۶۱	۲۸/۲۱
D5N13S5	۳/۱۵	۰/۵۳۹۶۲	۲۳۸۰/۹۶	۰/۳۴۸۵۹	۰/۷۵۱۲۲	۰/۰۱۰۰۵	۱۵/۹۰
D6N16S6	۵/۸۰	۰/۸۸۴۶۴	۵۲۲۸/۹۱	۰/۸۶۴۷۱	۰/۱۸۷۸۲	۰/۰۸۳۸۴	۱۹/۶۰
D7N18S7	۴/۴۰	۰/۷۹۶۷۰	۷۰۴۰/۵۰	۰/۷۸۴۲۹	۰/۲۹۵۸۶	۰/۰۵۷۰۹	۱۷/۶۸
D8N20S8	۴/۵۰	۰/۸۴۰۰۵	۷۷۳۰/۳۹	۰/۸۰۹۷۸	۰/۳۰۰۳۷	۰/۰۷۹۳۵	۲۳/۰۶
D8N22S9	۶/۰۵	۰/۸۱۶۹۳	۹۰۷۵/۰۲	۰/۷۷۸۶۷	۰/۲۱۹۰۷	۰/۰۸۳۳۴	۲۴/۱۴
D9N25S10	۶/۶۵	۰/۷۸۱۰۷	۹۴۳۲/۱۲	۰/۹۰۶۴۳	۰/۱۹۵۲۰	۰/۰۵۷۰۵	۲۵/۱۸
D9N30S10	۸/۰۵	۰/۷۷۳۲۹	۹۴۳۵/۰۳	۰/۹۰۶۸۳	۰/۱۳۹۰۵	۰/۰۶۶۶۳	۲۶/۷۳

تجربی هر نمونه هستند. مقدار Spacing بین ۰/۰۱۰۰۵ و ۰/۰۸۳۸۴ قرار داشت که تفاوت پراکندگی جواب‌ها در اجراها و نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. کمترین Spacing در D5N13S5 مشاهده شد؛ با این وجود، HV پایین و +IGD بالای این نمونه نشان می‌دهد یکنواختی توزیع به‌تنهایی تضمین‌کننده پوشش یا نزدیکی مناسب به جبهه مرجع نیست.

بررسی پراکندگی نتایج نیز پایداری متفاوت الگوریتم را در نمونه‌ها نشان داد. برای D9N30S10، میانگین و انحراف معیار Z_1 برابر ۰/۰۰۷۸۰±۰/۷۷۳۲۹ و فاصله اطمینان ۹۵ درصد آن برابر [۰/۷۶۹۶۴, ۰/۷۷۶۹۴] بود. برای D8N22S9 نیز مقدار ۰/۰۰۸۶۰±۰/۸۱۶۹۳ و فاصله اطمینان [۰/۸۱۲۹۰, ۰/۸۲۰۹۵] به دست آمد. در مقابل، انحراف معیار بالای HV در D5N13S5 نشان‌دهنده حساسیت بیشتر کیفیت جبهه به ماهیت تصادفی جست‌وجو در این نمونه است.

برای تکمیل ارزیابی پایداری روش، میانگین و انحراف معیار نمونه‌ای شاخص HV بر پایه ۲۰ اجرای مستقل برای هر ۱۰ نمونه در **جدول ۶** گزارش شده است. مطابق **جدول ۶**، در هفت نمونه با ابعاد متوسط و بزرگ، میانگین HV در بازه ۰/۷۷۸۶۷ تا ۰/۹۰۹۰۳ و انحراف معیار آن در بازه ۰/۰۷۹۱۳ تا ۰/۱۷۶۵۰ قرار دارد. همچنین، بزرگ‌ترین نمونه D9N30S10 با میانگین HV برابر ۰/۹۰۶۸۳، کمترین انحراف معیار را به میزان ۰/۰۷۹۱۳ نشان می‌دهد که بیانگر تمرکز مناسب نتایج اجراهای مستقل در بزرگ‌ترین مقیاس بررسی‌شده است.

جدول ۶. میانگین و انحراف معیار HV در ۲۰ اجرای مستقل برای همه نمونه‌ها

Table 6. Mean and standard deviation of HV over 20 independent runs for all instances

نمونه	میانگین HV	انحراف معیار HV
D3N8S3	۰/۶۳۸۴۱	۰/۳۹۹۸۷
D4N11S4	۰/۵۱۴۷۷	۰/۳۹۲۲۷
D4N30S10	۰/۹۰۹۰۳	۰/۱۱۶۵۶
D5N13S5	۰/۳۴۸۵۹	۰/۳۹۷۸۱
D6N16S6	۰/۸۶۴۷۱	۰/۱۷۶۵۰
D7N18S7	۰/۷۸۴۲۹	۰/۱۶۴۳۰
D8N20S8	۰/۸۰۹۷۸	۰/۱۶۱۰۸
D8N22S9	۰/۷۷۸۶۷	۰/۱۳۴۲۰
D9N25S10	۰/۹۰۶۴۳	۰/۱۱۲۲۵
D9N30S10	۰/۹۰۶۸۳	۰/۰۷۹۱۳

زمان اجرای الگوریتم، بین ۱۳/۱۱ و ۲۸/۲۱ ثانیه بود. در نمونه D9N30S10، الگوریتم طی متوسط ۲۶/۷۳ ثانیه، به‌طور میانگین ۸/۰۵ جواب نامغلوب با HV برابر ۰/۹۰۶۸۳ و +IGD برابر ۰/۱۳۹۰۵ تولید کرد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد افزایش ابعاد مسئله در نمونه‌های بررسی‌شده الزاماً با افت شدید کیفیت جبهه نامغلوب همراه نبوده است. برای بررسی مستقل هزینه محاسباتی زیرمسئله خطی، پروفایلی تکمیلی و جدا از ۲۰ اجرای اصلی، روی نمونه‌های D3N8S3، D7N18S7 و D9N30S10 انجام شد. برای هر نمونه، سه اجرای ترتیبی با بذرهای ۰ تا ۲ و همان تنظیمات اصلی الگوریتم انجام گرفت. زمان ثبت‌شده برای هر فراخوانی، تشکیل ساختارهای تنک، حل با HiGHS و استخراج مقادیر تحویل، موجودی و کمبود را دربرمی‌گیرد. در این اجراهای پروفایل‌شده، تعداد فراخوانی‌های LP با تعداد ارزیابی‌های کروموزوم برابر بود و برای هر نمونه در مجموع حدود ۷۳۲۰ فراخوانی LP ثبت شد. **جدول ۷** پروفایل هزینه محاسباتی زیرمسئله LP در سه مقیاس مسئله را نشان می‌دهد. مطابق **جدول ۷**، متوسط تعداد متغیرهای زیرمسئله که بر پایه همه فراخوانی‌های LP محاسبه شد، با افزایش اندازه مسئله از ۳۸/۲ به ۸۵/۶ و ۱۱۶/۱ افزایش یافت، درحالی‌که متوسط زمان پردازش هر LP به‌ترتیب فقط ۳/۱۳، ۳/۳۱ و ۳/۹۲ میلی‌ثانیه بود. سهم تجمعی زمان پردازش زیرمسئله LP از زمان کل اجرا نیز از ۵۱/۱۳ درصد به ۳۷/۷۱ و ۲۶/۵۹ درصد کاهش یافت. بنابراین، اگرچه هزینه مطلق زیرمسئله با افزایش اندازه مسئله رشد می‌کند، کاهش سهم نسبی آن نشان می‌دهد که در دامنه نمونه‌های بررسی‌شده، این زیرمسئله به عامل فزاینده غالب در مقیاس‌پذیری روش تبدیل نشده است. لازم به توضیح است که در این جدول، مقادیر به‌صورت میانگین ± انحراف معیار گزارش شده‌اند.

۵-۴- نمایش جبهه نامغلوب تجربی

برای نمایش مبادله میان اهداف، جبهه نامغلوب تجربی نمونه D9N30S10 در **شکل ۱** ارائه شده است. این جبهه از اجتماع جواب‌های ۲۰ اجرای مستقل و حذف نقاط مغلوب و تکراری تشکیل شد. **شکل ۱** وجود مبادله میان اهداف بشردوستانه و اقتصادی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که بهبود یک هدف ممکن است با تضعیف هدف دیگر همراه باشد. بنابراین، الگوریتم به‌جای یک جواب منفرد، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مصالحه‌ای را برای انتخاب متناسب با اولویت‌های تصمیم‌گیرنده فراهم می‌کند.

۵-۵- تحلیل حساسیت

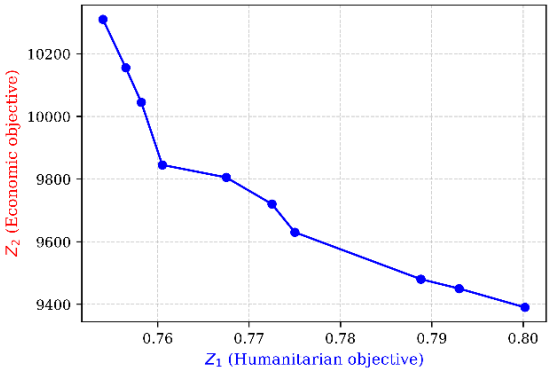
۵-۵-۱- اثر سرعت بازیابی شبکه

اثر سه سناریوی بازیابی کند، متوسط و سریع بر نمونه D6N16S6 بررسی شد. سایر پارامترها در تمام سناریوها ثابت نگه داشته شدند.

جدول ۷. پروفایل هزینه محاسباتی زیرمسئله LP در سه مقیاس مسئله

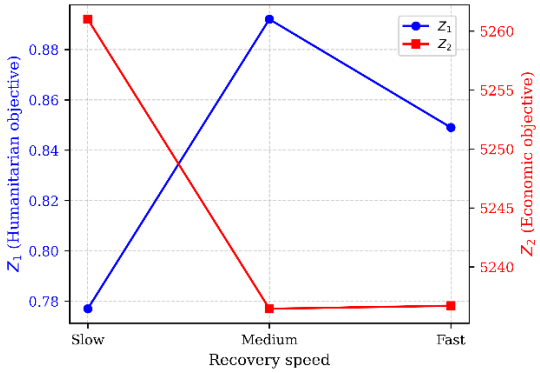
Table 7. Computational cost profile of the LP subproblem across three problem sizes

شاخص	D3N8S3	D7N18S7	D9N30S10
متوسط تعداد متغیرهای LP	۳۸/۲±۱/۶	۸۵/۶±۰/۲	۱۱۶/۱±۰/۵
زمان پردازش هر LP (میلی‌ثانیه)	۳/۱۳±۰/۶۷	۳/۳۱±۰/۲۸	۳/۹۲±۰/۳۴
سهم LP از زمان کل (درصد)	۵۱/۱۳±۲/۱۷	۳۷/۷۱±۰/۶۶	۲۶/۵۹±۰/۶۴



شکل ۱. جبهه نامغلوب تجربی نمونه D9N30S10.

Figure 1. Empirical non-dominated front for instance D9N30S10.



شکل ۲. حساسیت اهداف نسبت به سرعت بازیابی شبکه.

Figure 2. Sensitivity of objectives to network recovery speed.

جدول ۸. نتایج تحلیل حساسیت سرعت بازیابی

Table 8. Results of the recovery speed sensitivity analysis

سرعت بازیابی	Z_1	Z_2	HV	IGD+
کند	۰/۷۷۷۱	۵۲۶۱/۴۵	۰/۸۰۸۸	۰/۱۷۷۹
متوسط	۰/۸۹۱۸	۵۲۳۶/۴۵	۰/۸۳۹۳	۰/۲۷۱۰
سریع	۰/۸۴۹۱	۵۲۳۶/۹۴	۰/۸۸۷۴	۰/۲۳۲۲

جدول ۹. نتایج تحلیل حساسیت عدم‌قطعیت تقاضا

Table 9. Results of the demand uncertainty sensitivity analysis

سطح عدم‌قطعیت	Z_1	Z_2	HV	IGD+
پایین	۰/۷۱۰۸	۵۱۷۴/۱۱	۰/۸۹۸۲	۰/۱۹۳۷
پایه	۰/۸۹۱۸	۵۲۳۶/۴۵	۰/۸۳۹۳	۰/۲۷۱۰
بالا	۰/۷۹۳۴	۵۳۰۱/۳۲	۰/۸۲۰۵	۰/۲۶۲۸

نتایج در **جدول ۸** ارائه شده است. بیشترین HV برابر ۰/۸۸۷۴ در سناریوی بازیابی سریع به دست آمد که بیانگر پوشش گسترده‌تر فضای هدف در این سناریو است. با این حال، Z_1، Z_2 و IGD+ روند یکنواختی ندارند؛ برای مثال، کمترین IGD+ به سناریوی کند تعلق دارد و مقادیر Z_2 در سناریوهای متوسط و سریع تقریباً برابرند. مقادیر HV برای سناریوهای بازیابی کند، متوسط و سریع به‌ترتیب ۰/۸۰۸۸، ۰/۸۳۹۳ و ۰/۸۸۷۴ هستند. این نتایج نشان می‌دهد اثر بازیابی شبکه حاصل تعامل میان دسترسی یال‌ها، زمان سفر، تخصیص منابع و کمبود است و نمی‌توان آن را صرفاً با یک شاخص ارزیابی کرد. رفتار غیر یکنواخت Z_1 را می‌توان با این سازوکار تبیین کرد که تسریع بازیابی، علاوه بر بهبود سطح عملکرد یال‌ها و زمان سفر مؤثر، با گسترش مسیرهای شدنی، الگوی تخصیص خودرو و تحویل را بازآرایی می‌کند و در نتیجه سهم نسبی زمان سفر و کمبود انباشته در جواب‌های نامغلوب جابه‌جا می‌شود. IGD+ نیز به فاصله و پوشش جبهه نامغلوب نسبت به جبهه مرجع وابسته است؛ بنابراین تغییر شکل و گستره جبهه می‌تواند روند غیر یکنواخت این شاخص را توضیح دهد.

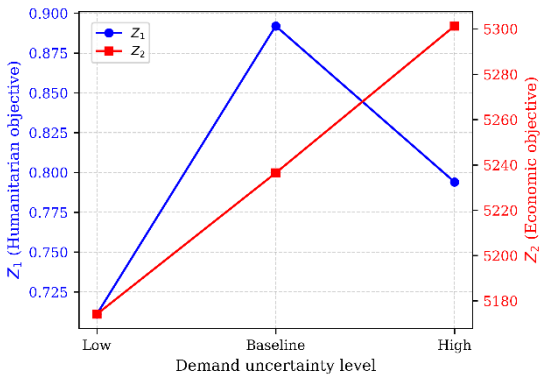
شکل ۲ حساسیت اهداف نسبت به سرعت بازیابی شبکه را نمایش می‌دهد.

۵-۵-۲- اثر عدم‌قطعیت تقاضا

اثر سه سطح عدم‌قطعیت تقاضا بر نمونه D6N16S6 بررسی شد و نتایج در **جدول ۹** ارائه شده‌اند. با افزایش عدم‌قطعیت از سطح پایین به بالا، Z_2 از ۵۱۷۴/۱۱ به ۵۳۰۱/۳۲ افزایش و HV از ۰/۸۹۸۲ به ۰/۸۲۰۵ کاهش یافت. بنابراین، در چارچوب فازی‌زدایی استفاده‌شده،

افزایش دامنه عدم‌قطعیت با افزایش هزینه اقتصادی و کاهش پوشش جبهه نامغلوب همراه بوده است. با این وجود، تغییرات Z_1 و IGD+ کاملاً یکنواخت نیستند؛ ازاین‌رو، نتیجه‌گیری درباره اثر عدم‌قطعیت باید براساس مجموعه شاخص‌ها انجام شود. مقادیر HV برای سطوح عدم‌قطعیت پایین، پایه و بالا به‌ترتیب ۰/۸۹۸۲، ۰/۸۳۹۳ و ۰/۸۲۰۵ هستند. رفتار غیر یکنواخت Z_1 را می‌توان به این‌صورت بیان کرد که در چارچوب فازی‌زدایی به‌کاررفته، تغییر دامنه عدم‌قطعیت، تقاضای فازی‌زدایی‌شده و در پی آن توازن عرضه، موجودی و کمبود و تصمیم‌های تخصیص، مسیریابی و تحویل را هم‌زمان تغییر می‌دهد. IGD+ نیز به فاصله و پوشش جبهه نامغلوب نسبت به جبهه مرجع وابسته است؛ بنابراین تغییر ساختار مصالحه میان اهداف می‌تواند روند غیر یکنواخت این شاخص را توضیح دهد.

حساسیت اهداف به عدم قطعیت تقاضا در **شکل ۳** نشان داده شده است.



شکل ۳. حساسیت اهداف نسبت به عدم‌قطعیت تقاضا.

Figure 3. Sensitivity of objectives to demand uncertainty.

۵-۶- مقایسه با نسخه پایه NSGA-II

برای سنجش اثر جهش‌های مسئله‌محور، الگوریتم پیشنهادی با نسخه پایه NSGA-II مقایسه شد. برای بررسی پایداری عملکرد در مقیاس‌های مختلف، مقایسه روی پنج نمونه انجام شد: D3N8S3 به‌عنوان نمونه کوچک، D7N18S7، D8N20S8 و D8N22S9 به‌عنوان نمونه‌های میانی و D9N30S10 به‌عنوان نمونه بزرگ.

دو نسخه از نظر کدگذاری، جمعیت اولیه، تقاطع، اصلاح، زیرمسئله LP و سایر تنظیمات یکسان بودند و تنها در نسخه پایه، جهش‌های انتقال بین‌خودرویی و بین‌دوره‌ای غیرفعال شدند.

برای هر الگوریتم و نمونه، ۲۰ اجرای مستقل با بذرهای یکسان ۰ تا ۱۹ انجام شد. جبهه مرجع تجربی هر نمونه از اجتماع جواب‌های نامغلوب دو الگوریتم در تمام اجراها تشکیل و پس از حذف نقاط مغلوب و تکراری استخراج شد.

میانگین نتایج در **جدول ۱۰** گزارش شده است. در این مقایسه، کران‌های کمینه و بیشینه نرمال‌سازی از اجتماع جواب‌های تمام اجراهای هر دو الگوریتم تعیین شدند و همراه با نقطه مرجع ثابت (1.1,1.1) برای دو روش یکسان بودند. ازآنجاکه مقدار گزارش‌شده HV بر مساحت جعبه مرجع تقسیم نشده است، مقادیر اندکی بیشتر از یک با این نحوه گزارش سازگارند. ازاین‌رو، مقادیر HV و IGD+ در **جدول ۱۰** براساس مرجع مشترک مقایسه‌ای محاسبه شده‌اند و ممکن است با مقادیر **جدول ۵** تفاوت داشته باشند.

الگوریتم پیشنهادی در سه نمونه میانی HV بالاتر و IGD+ پایین‌تری به دست آورد. کاهش IGD+ در نمونه‌های D7N18S7، D8N20S8 و D8N22S9 به‌ترتیب ۸۴/۵۵، ۷۹/۰۱ و ۸۷/۲۴ درصد بود. همچنین، میانگین ND از حدود ۱ تا ۱/۲ در نسخه پایه، به‌ترتیب به ۴/۴۰، ۴/۵۰ و ۶/۰۵ افزایش یافت.

در نمونه کوچک D3N8S3، میانگین HV از ۰/۴۱۳۱ در نسخه پایه به ۰/۷۳۳۳ در روش پیشنهادی افزایش یافت و میانگین IGD+ از ۰/۶۷۴۳ به ۰/۳۸۰۲ کاهش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد در نمونه کوچک، کیفیت پوشش و نزدیکی جبهه با وجود تعداد کمتر نقاط نامغلوب بهبود یافته است. در نمونه بزرگ D9N30S10 نیز میانگین HV از ۰/۸۰۵۳ به ۰/۹۰۹۰ افزایش و میانگین IGD+ از ۰/۲۰۷۷ به ۰/۱۳۴۸ کاهش یافت؛ میانگین ND نیز از ۶/۲۵ به ۸/۰۵ رسید. این نتایج نشان می‌دهد جهش‌های مسئله‌محور موجب افزایش پوشش فضای هدف، نزدیکی بیشتر به جبهه مرجع و تولید گزینه‌های مصالحه‌ای متنوع‌تر شده‌اند.

مقادیر صفر شاخص Spacing در نسخه پایه نباید به‌عنوان نشانه توزیع یکنواخت‌تر جبهه تفسیر شوند. بررسی اجراها نشان داد که جبهه نامغلوب نسخه پایه در این نمونه‌ها غالباً تک‌نقطه‌ای و در معدودی از اجراها تنها دونقطه‌ای

بوده است. در حالت تک‌نقطه‌ای، شاخص Spacing امکان سنجش پراکندگی را ندارد و مطابق پیاده‌سازی به‌کاررفته مقدار صفر بازمی‌گرداند؛ در حالت دونقطه‌ای نیز دو فاصله نزدیک‌ترین همسایه برابرند و در نتیجه مقدار شاخص صفر می‌شود. بنابراین، مقادیر صفر مشاهده‌شده در اینجا با تعداد بسیار محدود جواب‌های نامغلوب و تنوع محدود جبهه مرتبط هستند و نباید به‌عنوان شواهدی از کیفیت بهتر توزیع تفسیر شوند. این تفسیر با مقادیر پایین‌تر ND در نسخه پایه نیز سازگار است.

برای ارزیابی معناداری اختلاف‌ها، آزمون زوجی ناپارامتری ویلکاکسون بر نتایج حاصل از بذرهای یکسان انجام شد. در سه نمونه میانی، الگوریتم پیشنهادی در تمام ۲۰ زوج، HV بالاتر و IGD+ پایین‌تری داشت. مقدار احتمال دقیق آزمون برای هر دو شاخص در هر سه نمونه برابر بود با: $p = 1.91 \times 10^{-6}$. یکسان‌بودن این مقدار در شش آزمون ناشی از هم‌جهت‌بودن کامل تفاضل‌های زوجی غیرصفر بود؛ ازاین‌رو، آماره آزمون دوطرفه دقیق ویلکاکسون در همه موارد $W = 0$ شد و برای $n = 20$، کمترین مقدار p قابل حصول در این حالت برابر با $p_{min} = 2\left(\frac{1}{2}\right)^{20} = 1.9073486 \times 10^{-6}$ است. این نتیجه نشان می‌دهد جهت برتری روش پیشنهادی در هر دو شاخص و تمام اجراهای زوجی مورد بررسی یکسان بوده است. بنابراین، اختلاف دو نسخه در سطح خطای ۰/۰۵ معنادار است.

در نمونه کوچک D3N8S3، روش پیشنهادی برای هر دو شاخص در ۱۶ زوج از ۲۰ زوج بهتر بود و مقادیر دقیق دوطرفه p برای HV و IGD+ به‌ترتیب ۰/۰۰۱۴۳۲ و ۰/۰۰۱۶۹۰ به دست آمد. در نمونه بزرگ D9N30S10 نیز این برتری در ۱۹ زوج از ۲۰ زوج مشاهده شد و مقادیر متناظر p برابر ۰/۰۰۰۰۴۷۷ و ۰/۰۰۰۱۶۷۸ بودند. بنابراین، اختلاف دو نسخه در هر دو مقیاس افزوده‌شده نیز در سطح خطای ۰/۰۵ معنادار است.

از نظر زمان، در میان سه نمونه میانی، الگوریتم پیشنهادی در D7N18S7 و D8N20S8 به‌ترتیب حدود ۱۴/۳۴ و ۱۰/۸۷ درصد سریع‌تر بود. میانگین زمان آن در D8N22S9 بیشتر شد که عمدتاً ناشی از اجرای پرت بذر ۱۴ با زمان نزدیک به ۱۲۰ ثانیه بود؛ این مشاهده حذف نشد و در میانگین باقی ماند. در مجموع، نتایج مقایسه کنترل‌شده نشان می‌دهد افزودن جهش‌های بین‌خودرویی و بین‌دوره‌ای، بدون تغییر سایر اجزای الگوریتم، کیفیت و تنوع جبهه نامغلوب را به‌طور معناداری بهبود داده است.

۵-۷- اعتبارسنجی تکمیلی با حل دقیق در نمونه کوچک

به‌منظور ایجاد یک محک مستقل برای سنجش کیفیت جواب‌های الگوریتم پیشنهادی، نمونه کوچک D3N8S3 با یک فرمول‌بندی برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط مسیرمبنا حل شد. در این فرمول‌بندی، همه ۵۴۴ مسیر ساده انبارمبنا متشکل از یال‌های در دسترس در دوره‌های فعال شمارش شدند و خودروهای همگن نیز تجمیع شدند.

جدول ۱۰. مقایسه الگوریتم پیشنهادی و نسخه پایه

Table 10. Comparison results of the proposed algorithm and the Baseline Version

نمونه	الگوریتم	HV	IGD+	Spacing	ND	زمان (ثانیه)
D3N8S3	نسخه پایه	۰/۴۱۳۱	۰/۶۷۴۳	۰/۰۶۶۵	۴/۷۰	۱۹/۱۹
	پیشنهادی	۰/۷۳۳۳	۰/۳۸۰۲	۰/۰۲۰۲	۳/۳۵	۱۳/۱۱
D7N18S7	نسخه پایه	۰/۰۹۴۱	۰/۹۶۱۶	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰	۱۵/۶۴
	پیشنهادی	۱/۰۰۰۳	۰/۱۴۸۶	۰/۰۵۰۵	۴/۴۰	۱۳/۴۰
D8N20S8	نسخه پایه	۰/۲۱۹۸	۰/۸۴۰۴	۰/۰۰۰۰	۱/۲۰	۱۷/۳۷
	پیشنهادی	۰/۹۹۳۴	۰/۱۷۶۴	۰/۰۸۸۴	۴/۵۰	۱۵/۴۸
D8N22S9	نسخه پایه	۰/۱۳۶۲	۰/۸۸۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۱۵	۲۰/۲۲
	پیشنهادی	۱/۰۰۰۶	۰/۱۱۲۳	۰/۰۷۶۳	۶/۰۵	۲۲/۵۷
D9N30S10	نسخه پایه	۰/۸۰۵۳	۰/۲۰۷۷	۰/۰۵۹۴	۶/۲۵	۳۰/۷۵
	پیشنهادی	۰/۹۰۹۰	۰/۱۳۴۸	۰/۰۶۶۴	۸/۰۵	۲۶/۷۳

مدل حاصل شامل ۱۹۵۷ متغیر، از جمله ۵۴۷ متغیر صحیح، و ۱۲۶۹ محدودیت بود. برای اعتبارسنجی، نقطه کرانی متناظر با کمینه‌سازی هدف بشردوستانه Z_1 به‌صورت دقیق حل شد. حل مدل با استفاده از حل‌گر HiGHS با وضعیت بهینه و شکاف MIP صفر خاتمه یافت. مقدار بهینه دقیق Z_1 برابر با ۰/۳۴۴۷۸۲ بود؛ درحالی‌که بهترین مقدار حاصل از ۲۰ اجرای مستقل الگوریتم پیشنهادی برابر با ۰/۳۴۶۴۳۴ به دست آمد. بنابراین، انحراف نسبی الگوریتم پیشنهادی از جواب بهینه دقیق فقط ۰/۴۸ درصد است. این فاصله کمتر از نیم‌درصد نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در نمونه قابل‌حل دقیق قادر به دستیابی به جوابی بسیار نزدیک به بهینه است. زمان حل مدل دقیق در این نقطه کرانی ۷۶/۲۷ ثانیه بود؛ در مقابل، میانگین زمان هر اجرای الگوریتم پیشنهادی ۱/۱۴±۱۳/۱۱ ثانیه به دست آمد.

با توجه به اینکه کیفیت مجموعه جواب‌های چندهدفه در بخش‌های پیشین بر اساس شاخص‌های HV و IGD+ ارزیابی شده است، آزمون حاضر یک محک دقیق و مستقل در سطح نقطه کرانی فراهم می‌کند. بدین‌ترتیب، ارزیابی مجموعه‌ای جبهه‌های نامغلوب و مقایسه با جواب بهینه دقیق، دو شاهد مکمل درباره کیفیت روش پیشنهادی ارائه می‌دهند. **جدول ۱۱** اعتبارسنجی مقدار هدف بشردوستانه Z_1 در نمونه D3N8S3 را نشان می‌دهد. زمان الگوریتم پیشنهادی به‌صورت میانگین ± انحراف معیار ۲۰ اجرای مستقل گزارش شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل دوهدفه مکان‌یابی-مسیریابی برای توزیع اقلام امدادی پس از بحران ارائه شد که تصمیم‌های مکان‌یابی انبار، تخصیص خودرو، موجودی، تحویل و مسیریابی را با درنظرگرفتن تقاضای فازی و بازیابی دوره‌ای شبکه یکپارچه می‌کند. برای حل مدل، نسخه‌ای مسئله‌محور از NSGA-II شامل کدگذاری مسیرمحور، زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی، رویه اصلاح و عملگرهای جهش توسعه‌یافته طراحی شد

ارزیابی روش پیشنهادی در ۲۰ اجرای مستقل روی ۱۰ نمونه معیار، توانایی آن را در تولید مجموعه‌های نامغلوب نشان داد. بیشترین میانگین HV برابر ۰/۹۰۹۰۳ و کمترین میانگین IGD+ برابر ۰/۱۳۴۹۳ به دست آمد. تحلیل حساسیت نیز نشان داد سرعت بازیابی شبکه و سطح عدم‌قطعیت تقاضا بر اهداف و کیفیت جبهه نامغلوب اثرگذارند. به‌ویژه، در چارچوب فازی‌زدایی استفاده‌شده، افزایش عدم‌قطعیت از سطح پایین به بالا با افزایش هزینه اقتصادی و کاهش HV همراه بود.

برای سنجش نقش جهش‌های مسئله‌محور، روش پیشنهادی با نسخه پایه NSGA-II، تحت تنظیمات و بذرهای یکسان، روی پنج نمونه شامل مقیاس‌های کوچک، میانی و بزرگ مقایسه شد. در همه نمونه‌ها، میانگین HV بالاتر و میانگین IGD+ پایین‌تر بود و آزمون زوجی ویلکاکسون تفاوت‌ها را معنادار نشان داد؛ این نتیجه پایداری بهبود کیفیت جبهه را در مقیاس‌های مختلف تأیید می‌کند.

در مجموع، چارچوب پیشنهادی می‌تواند مجموعه متنوع‌تری از راه‌حل‌های مصالحه‌ای میان اهداف بشردوستانه و اقتصادی در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار دهد. بررسی ناوگان ناهمگن، چند نوع کالای امدادی، عدم‌قطعیت سایر پارامترها، داده‌های واقعی بحران و مقایسه با سایر الگوریتم‌های چندهدفه، مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده هستند.

جدول ۱۱. اعتبارسنجی مقدار هدف بشردوستانه Z_1 در نمونه D3N8S3

Table 11. Exact validation of the humanitarian objective Z_1 for instance D3N8S3

روش	مبنای گزارش	بهترین مقدار Z_1	انحراف از حل دقیق (٪)	زمان اجرا (ثانیه)
MILP مسیرمبنا	جواب بهینه با شکاف MIP صفر	۰/۳۴۴۷۸۲	۰/۰۰	۷۶/۲۷
الگوریتم پیشنهادی	بهترین نتیجه در ۲۰ اجرای مستقل	۰/۳۴۶۴۳۴	۰/۴۸	۱/۱۴±۱۳/۱۱ برای هر اجرا

در طراحی آزمایش این پژوهش، سه پروفایل متمایز و تفسیرپذیر بازیابی شامل کند، متوسط و سریع برای ارزیابی کنترل‌شده اثر سرعت بازگشایی شبکه به‌کار گرفته شد. با توجه به اینکه پروفایل بازیابی به‌صورت ورودی برون‌زا وارد مدل می‌شود، چارچوب ارائه‌شده قابلیت بررسی مجموعه گسترده‌تری از پروفایل‌های بازیابی را دارد. بهره‌گیری از سناریوهای متراکم‌تر و داده‌محور، تفکیک زمانی ریزتر و پروفایل‌های پیوسته زمانی می‌تواند در پژوهش‌های آینده دامنه ارزیابی را توسعه دهد.

قدردانی

نویسنده صمیمانه از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری، به‌دلیل حمایت‌ها و همکاری‌های ارزشمند آنان، قدردانی می‌کند.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مشارکت‌های نویسندگان

حبیبه نظیف: مفهوم‌پردازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش - بازبینی و ویرایش.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان یافته‌های این پژوهش، در صورت درخواست معقول از نویسنده قابل دسترسی است.

مراجع

Anuar, W. K., Lee, L. S., & Pickl, S. (2022). Benchmark dataset for multi depot vehicle routing problem with road capacity and damage road consideration for humanitarian operation in critical supply delivery. *Data in Brief*, *41*, 107901. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107901

Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *11*(2), 101–121. https://doi.org/10.1080/13675560701561789

Barbarosoğlu, G., & Arda, Y. (2004). A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, *55*(1), 43–53. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601652

Bozorgi-Amiri, A., & Khorsi, M. (2016). A dynamic multi-objective location–routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *85*(5–8), 1633–1648. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7923-3

Campbell, A. M., Vandenbussche, D., & Hermann, W. (2008). Routing for relief efforts. *Transportation Science*, *42*(2), 127–145. https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0209

Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, *46*(1), 4–13. https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(2), 182–197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

Farzaneh, M. A., Rezapour, S., Baghaian, A., & Amini, M. H. (2023). An integrative framework for coordination of damage assessment, road restoration, and relief distribution in disasters. *Omega*, *115*, 102748. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102748

Gheysarieh, S., Bagherinejad, J., & Shoeib, M. (2024). Evacuation planning with optimal location of shelters during an accident by prioritizing affected people based on physical condition: A case study in District 6 of Tehran. *System Engineering and Productivity*, *4*(2), 1–15 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2024.2027320.1209

Hassanpour, H. A., Aliyari, S., Barzegar, H., & Zarei, M. (2023). Modeling supply chain disruption in the apparel supply chain and analyzing its improvement solution with a system dynamics approach. *System Engineering and Productivity*, *3*(3), 33–62 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2023.711489

Hu, Q.-M., Hu, Y., & Li, X. (2024). Multi-period emergency facility location-routing problems under uncertainty and risk aversion. *Socio-*

approach and its effects in intuitive fuzzy environment (Case study: Iran Central Iron Ore Company - Bafgh). *System Engineering and Productivity*, *3*(2), 61–88 (In Persian). https://doi.org/10.22034/msb.2023.709552

Sheu, J.-B. (2007). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *43*(6), 687–709. https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.04.004

Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2025). A probabilistic bi-objective model for a humanitarian location-routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational Research*, *32*(2), 590–625. https://doi.org/10.1111/itor.13475

Tofighi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *250*(1), 239–250. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.059

Vahdani, B., Veysmoradi, D., Shekari, N., & Mousavi, S. M. (2018). Multi-objective, multi-period location-routing model to distribute relief after earthquake by considering emergency roadway repair. *Neural Computing and Applications*, *30*(3), 835–854. https://doi.org/10.1007/s00521-016-2696-7

Yi, W., & Kumar, A. (2007). Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *43*(6), 660–672. https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.05.004

Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., & da Fonseca, V. G. (2003). Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *7*(2), 117–132. https://doi.org/10.1109/TEVC.2003.810758

Economic Planning Sciences, *96*, 102093. https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102093

Ishibuchi, H., Doi, K., & Nojima, Y. (2017). On the effect of normalization in MOEA/D for multi-objective and many-objective optimization. *Complex & Intelligent Systems*, *3*, 279–294. https://doi.org/10.1007/s40747-017-0061-9

Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodríguez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution. *European Journal of Operational Research*, *177*(3), 1599–1609. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002

Khanchehzarrin, S., Ghaebi Panah, M., Mahdavi-Amiri, N., & Shiripour, S. (2022). A bi-level multi-objective location-routing optimization model for disaster relief operations considering public donations. *Socio-Economic Planning Sciences*, *80*, 101165. https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101165

Malekpour Kolbadinejad, S., & Bagherinejad, J. (2023). Presenting a dual-objective location-inventory model for designing an integrated forward/reverse logistics network. *System Engineering and Productivity*, *3*(1), 1–40 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2023.706141

Moshiri, S., & Rashidi Komijan, A. (2023). Integrated supply-production-distribution model with the aim of profit maximization (Case study: Zimaband Ariafer Factory). *System Engineering and Productivity*, *3*(1), 157–184 (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2023.706146

Najafi, M., Eshghi, K., & Dullaert, W. (2013). A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *49*(1), 217–249. https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.09.001

Özdamar, L., Ekinci, E., & Küçükyazıcı, B. (2004). Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research*, *129*, 217–245. https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000030690.27939.39

Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, *44*(4), 521–534. https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.08.003

Sanci, E., & Daskin, M. S. (2019). Integrating location and network restoration decisions in relief networks under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *279*(2), 335–350. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.012

Sayyadi Tooranloo, H., Hafizi Atabak, R., & Chehrehgosha, N. (2023). Risk assessment in sustainable supply chain with failure analysis